



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU



**Određivanje HVL-a u oblasti zaštite od zračenja  
dozimetrijskom i spektrometrijskom metodom**

- Master rad –

Mentor:

Prof. dr Nataša Todorović

Student:

Milica Stupar 259m/20

Novi Sad, decembar 2022.

# SADRŽAJ:

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Nastanak x zračenja</b> .....	2
2.1 Otkriće x zraka.....	2
2.2 Zakočno x zračenje .....	3
2.3 Karakteristično x zračenje.....	4
2.3.1 Ožeovi elektroni i fluorescentni prinos .....	5
<b>3. Interakcija zračenja sa materijom</b> .....	5
3.1 Interakcija x zračenja sa materijom.....	7
3.1.1 Rejljevo rasijanje .....	7
3.1.2 Komptonovo rasijanje.....	8
3.1.3 Fotoelektrični efekat .....	9
3.1.4 Produkcija para .....	10
<b>4. Atenuacija rendgenskih zraka</b> .....	11
4.1 Linearni koeficijent atenuacije.....	11
4.2 Maseni koeficijent atenuacije .....	11
4.3 Inherentna i dodatna filtracija rendgenskog snopa .....	12
4.4 HVL .....	12
4.5 Otvrđjavanje snopa zračenja .....	13
<b>5. Dozimetrijske veličine i jedinice</b> .....	14
5.1 Fluens, fluks i energijski fluens .....	14
5.2 Kerma.....	15
5.3 Apsorbovana doza.....	16
5.4 Ekspozicija .....	16
5.5 Ekvivalentna doza .....	17
5.6 Efektivna doza.....	18
5.7 Operativne fizičke veličine – dozni ekvivalent .....	19
5.7.1 Ambijentalni dozni ekvivalent $H^*(10)$ .....	19
5.7.2 Lični dozni ekvivalent $H_p(d)$ .....	19
<b>6. Instrumenti za mjerenje zračenja – Dozimetri</b> .....	19
6.1 Vrste dozimetara .....	21
6.1.1 Gasni dozimetri .....	21
<b>7. Rendgen aparati u dozimetrijskim laboratorijama</b> .....	23

7.1 Rendgenska cijev .....	23
7.2 Profil rendgenskog snopa .....	25
<b>8. Mjerenja i rezultati</b> .....	<b>26</b>
8.1 Energetska zavisnost.....	31
8.2 Flourescentno zračenje .....	32
8.3 Određivanje HVL-a dozimetrijskom metodom .....	35
<b>9. Spektrometrijska metoda</b> .....	<b>38</b>
9.1 Određivanje HVL-a spektrometrijskom metodom.....	45
<b>Zaključak</b> .....	<b>51</b>
<b>Literatura</b> .....	<b>52</b>

# 1. Uvod

EURAMET, koji je osnovan 2007. godine prema njemačkom zakonu kao neprofitno udruženje, je regionalna metrološka organizacija (RMO) Evrope čija je misija da razvija i širi integrisanu, isplativu i međunarodno konkurentnu mjernu infrastrukturu uzimajući u obzir potrebe industrije, biznisa i vlada. Dva glavna alata za postizanje ovih ciljeva su Evropski metrološki istraživački program (EMRP *engl. European Metrology Research Programme*) i Evropski metrološki program za inovacije i istraživanje (EMPIR *engl. European Metrology Programme for Innovation and Research*) sa više od 100 zajedničkih istraživačkih projekata. Koordinator je u saradnji nacionalnih metroloških instituta (NMI *engl. National Metrology Institutes*) i imenovanih instituta (DI *engl. Designated Institutes*) u Evropi u oblastima kao što su istraživanja u metrologiji, sljedivost mjerenja do SI jedinica, međunarodno priznanje nacionalnih mjernih etalona kao i kalibracione i mjerne mogućnosti (CMC).

Jedan od EMPIR projekata iz oblasti jonizujućeg zračenja bio je i 17RPT01 DOSETrace, koji je imao za cilj razvoj i validaciju metoda preduzimanjem međunarodnih poređenja i proširenjem mogućnosti kalibracije dozimetara za zaštitu od zračenja na ciljanu tačnost mjerenja doze od 5% ili manje. Shodno tome, tehnički kapaciteti NMI-ova, među kojima je i Institut za metrologiju Bosne i Hercegovine, će biti značajno poboljšani što će dovesti do preciznijih i pouzdanijih mjernih usluga za njihove krajnje korisnike.

Ideja za Master rad nastala je iz jednog od radnih paketa projekta DOSETrace. Uočena su neslaganja između teorijskih proračuna, datih u standardu ISO 4037-1:2019 i eksperimentalnih proračuna. Iz tog razloga, rad je baziran na detaljnim eksperimentalnim istraživanjima i analizama zahtjeva objavljene verzije standarda ISO 4037-1:2019, s posebnim fokusom na lični dozni ekvivalent  $H_p(10)$  i ambijentalni dozni ekvivalent  $H^*(10)$ .

Sama lokacija za rad, prema zahtjevima EURAMETA, ne može biti metrološki institut u kojem je istraživač zaposlen. Shodno tome, domaćin je bio IST (Instituto Superior Técnico), tj. Laboratorija za jonizujuće zračenje (LMRI) koja je dio IST-ove Laboratorije za zaštitu i sigurnost od jonizujućeg zračenja (LPSR).

Tehnički dio master rada bio je podjeljen u nekoliko zadataka: kalibracije jonizacionih komora u oblasti zaštite od zračenja na rendgenu, provjere uticaja fluorescentnog zračenja u odnosu na redosljed filtera određenog rendgenskog kvaliteta, provjera zahtjeva standarda ISO 4037-1:2019 o energetske zavisnosti jonizacionih komora i određivanje HVL-a rendgenskih kvaliteta iz oblasti zaštite od zračenja dozimetrijskom i spektrometrijskom metodom.

## 2. Nastanak x zračenja

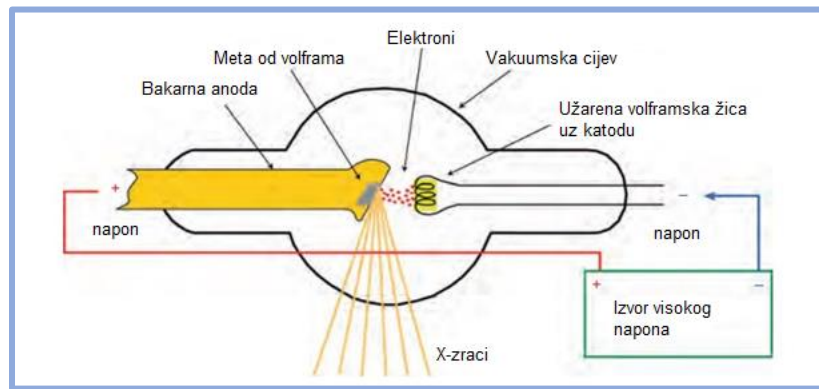
### 2.1 Otkriće x zraka

Njemački fizičar Wilhelm Conrad Röntgen objavljuje 1895. godine da je u modificiranoj Crookesovoj cijevi otkrio nevidljive zrake koje izazivaju fluorescenciju, prolaze kroz materiju, te skreću pod dejstvom magnetnog polja. Röntgen je te zrake nazvao x zrake zbog njihove nepoznate prirode. Otkriće rendgenskih zraka nastalo je ispitivanjem katodnih zraka. Röntgen je opazio da iz mjesta na koje padnu katodne zrake izlaze neke nove zrake. Nove zrake pokazuju slične osobine s elektromagnetnim talasima i ne daju se saviti električnim ili magnetnim poljima, dakle nisu struje nabijenih električnih čestica. Iz ovih osobina Röntgen je zaključio da su novi zraci talasi. Kasnije ispitivanje potpuno je potvrdilo ovo mišljenje. [1]

Rendgenski zraci imaju mnogo manju talasnu dužinu od obične svjetlosti, između 0.001 i 10 nm, što približno odgovara oblasti između ultraljubičastog i gama zračenja. Kratka talasna dužina daje rendgenskim zracima veliku prodornost. Mogu nesmetano prolaziti kroz tanke listiće materije. Tek prolaskom zraka kroz deblje slojeve, bivaju postepeno apsorbirani. Apsorpcija rendgenskih zraka zavisi od vrste materijala kroz koji zraci prolaze. Jače ih apsorbiraju elementi s većom atomskom masom. Tako olovo znatno jače prigušuje rendgenske zrake za razliku od vodonika ili kiseonika. Na tom svojstvu zasniva se primjena rendgenskih zraka u medicini. [1]

Rendgensko zračenje nastaje kada elektroni velikom brzinom udaraju u metal (anodu), pri čemu dolazi do njihovog naglog usporavanja i izbijanja elektrona iz unutrašnjih ljuski atoma metala. Pri bombardovanju metala brzim elektronima, nastaju dvije različite komponente rendgenskog zračenja. Naglim kočenjem brzih elektrona u metalu nastaje zakodno zračenje (*njem. bremsstrahlung*), sa konstantnim spektrom intenziteta po različitim talasnim dužinama. Izbacivanjem elektrona iz atomskih ljuski nižih energetske nivoa, brzim elektronima koji udaraju u metal, te popunjavanjem tih praznih mjesta elektronima iz viših energetske nivoa, nastaje rendgensko zračenje sa samo nekoliko talasnih dužina, karakterističnih za hemijski element od kojeg je anoda. To je karakteristično zračenje sa linijskim spektrom.[1]

Uobičajen način nastajanja x zračenja je u rendgenskoj cijevi (slika 1.). To je vakuumska cijev u kojoj se sa jedne strane nalazi anoda, a sa druge katoda uz koju se nalazi užarena nit. Katoda je na visokom naponu u odnosu na anodu. Kada kroz niti teče električna struja ona se užari (volfram se užari na oko 2 600 K), pa katoda izbacuje elektrone koji se ubrzavaju u električnom polju između katode i anode. Elektroni udaraju u anodu koja je napravljena od materijala koji su otporni na visoku temperaturu, poput molibdenijuma i volframa, a ujedno ulje prisilno kruži kako bi imala što bolje hlađenje. Pri tome se 99 % energije elektrona pretvara u toplotnu, a samo 1 % odlazi u obliku jonizujućeg zračenja koje pod pravim uglom izlazi kroz mali prozor na rendgenskoj cijevi.[1]



**Slika 1.** Pojednostavljen prikaz rendgenske cijevi i nastanka rendgenskih zraka.[1]

Rendgenski zraci se dijele na tvrde i mekane rendgenske zrake s obzirom na mogućnost prodiranja kroz razne materijale. Mekani rendgenski zraci imaju talasnu dužinu od 0.1 nm do 10 nm (0.12 do 12 keV). Tvrde rendgenski zraci imaju talasnu dužinu od 0.001 nm do 0.1 nm (12 do 120 keV). Osnovna razlika između rendgenskih i gama zraka je u načinu njihovog nastajanja. Rendgenski zraci nastaju u vanjskom elektronskom omotaču atoma, dok gama zraci nastaju u jezgru atoma.[1]

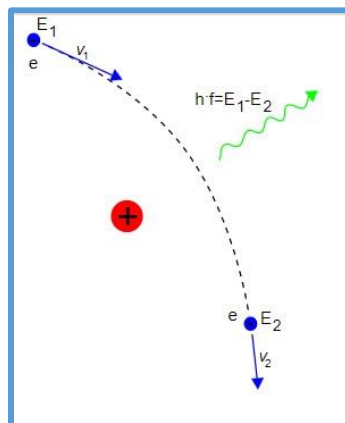
## 2.2 Zakočno x zračenje

Zakočno zračenje, je elektromagnetno zračenje koje nastaje pri ubrzanju slobodne naelektrisane čestice. Uopšteno, to je zračenje kojim elektroni gube energiju i bivaju usporeni pri prolasku kroz materiju. Riječ je o rendgenskom zračenju emitovanom u međudjelovanju elektrona s atomskim jezgrima u materiji.

Prolaskom elektrona u neposrednoj blizini atomskog jezgra, on se naglo usporava i brzina mu se smanjuje. Posljedica toga je i veliko smanjenje početne energije, a razlika energije se pretvara u foton elektromagnetnog zračenja (slika 2.):

$$E = h \cdot f \quad (2.2.1)$$

gdje je:  $f$  – frekvencija i  $h$  - Planckova konstanta.



**Slika 2.** Skica rendgenskog zakočnog zračenja.[1]

Izraz (2.3.1) se može napisati i u drugom obliku:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.3.2)$$

gdje je:  $\lambda$  – talasna dužina i  $c$  – brzina svjetlosti u vakuumu. Intenzitet zračenja zavisi i od materijala anode, što je veći atomski broj  $Z$  metala od kojeg je anoda napravljena, to je veći i intenzitet zračenja. Intenzitet zračenja zavisi još i o anodnom naponu i o jačini električne struje (jer je ona pokazatelj broja elektrona koji bombarduju anodu). Mjerenja su pokazala da je intenzitet zračenja proporcionalan kvadratu anodnog napona. Tek uz visok napon (oko 400 000 V) i veliki atomski broj  $Z$ , može se postići visok stepen iskorištenja, a to je oko 3 % jonizujućeg zračenja dok 97 % odlazi na zagrijavanje anode.[1]

### 2.3 Karakteristično x zračenje

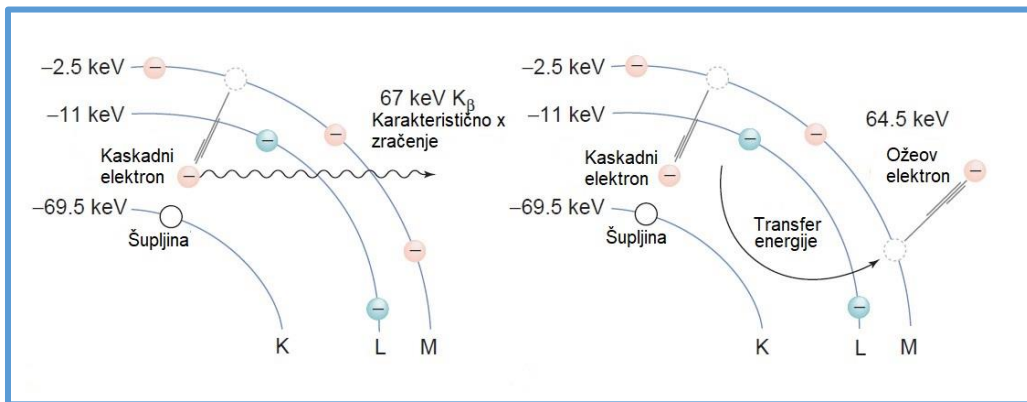
Prelazi elektrona između atomskih omotača mogu dovesti do emisije zračenja u vidljivom, UV i rendgenskom dijelu elektromagnetnog spektra. Energija ovog zračenja je karakteristična za svaki atom, jer energije veze elektrona zavise od atomskog (rednog) broja  $Z$ . Emisije zračenja, pri energijama prelaza većim od 100 eV, nazivaju se karakterističnim ili fluorescentnim rendgenskim zracima. Karakteristični rendgenski zraci nazivaju se prema orbitali u kojoj je došlo do slobodnog mjesta. Na primjer, zračenje koje nastaje usljed izbacivanja elektrona iz unutrašnje K ljuske naziva se K-karakteristično x zračenje, a zračenje nastalo izbacivanjem elektrona iz L ljuske naziva se L karakteristično x zračenje. Ako je nastala šupljina u jednoj ljusci popunjena elektronom iz susjedne ljuske, karakteristično zračenje označava se alfa indeksom (npr.  $L \rightarrow K$  prelaz =  $K_\alpha$ ,  $M \rightarrow L$  prelaz =  $L_\alpha$ ). Ako je mjesto šupljine popunjeno iz nesusjedne ljuske, označava se beta indeksom (npr.  $M \rightarrow K$  prelaz =  $K_\beta$ ). Energija karakterističnog rendgenskog zraka ( $E_{x\text{-zračenje}}$ ) je razlika između energija veze elektrona ( $E_b$ ) date ljuske:

$$E_{x\text{-zračenje}} = E_{b \text{ ljuske sa šupljinom}} - E_{b \text{ popunjene ljuske}} \quad (2.3.1)$$

Dakle, kao što je ilustrovano na slici 3, prelaz iz M u K ljusku u volframu bi rezultovao  $K_\beta$  karakterističnom x zračenju [1]:

$$E(K_\beta) = E_{bK} - E_{bM} \quad (2.3.2)$$

$$E(K_\beta) = 69.5 \text{ kV} - 2.5 \text{ kV} = 67 \text{ kV}$$



**Slika 3.** Deekscitacija atoma volframa. Prelaz elektrona, koji popunjava prazno mjesto u ljusci bližoj jezgri, biće praćen ili emisijom karakterističnog zračenja ili emisijom Ožeovog elektrona.[1]

### 2.3.1 Ožeovi elektroni i fluorescentni prinos

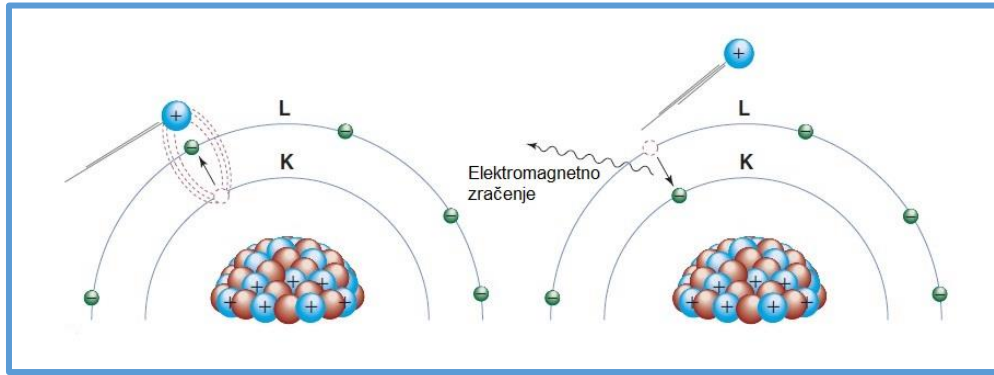
Kaskadni prelazi elektrona ne rezultiraju uvijek proizvodnjom karakterističnih rendgenskih zraka. Proces koji dominira kod atoma sa niskim vrijednostima broja  $Z$  je nastanak Ožeovog elektrona. U ovom slučaju, oslobođena energija se obično prenosi na orbitalni elektron u istoj ljusci, gdje je i kaskadni elektron (slika 3 desno). Izbačeni Ožeov elektron posjeduje kinetičku energiju jednaku razlici između energije prelaza i energije veze izbačenog elektrona [1].

## 3. Interakcija zračenja sa materijom

Čestice jonizujućeg zračenja uključuju naelektrisane čestice, kao što su alfa čestice ( $\alpha^{+2}$ ), protoni ( $p^+$ ), beta čestice ( $\beta^-$ ), pozitroni ( $\beta^+$ ), energetski ekstranuklearni elektroni ( $e^-$ ) i nanaelektrisane čestice, kao što su neutroni. Ponašanje teško naelektrisanih čestica (npr. alfa čestica i protona) se razlikuje od ponašanja lakših naelektrisanih čestica kao što su elektroni i pozitroni.

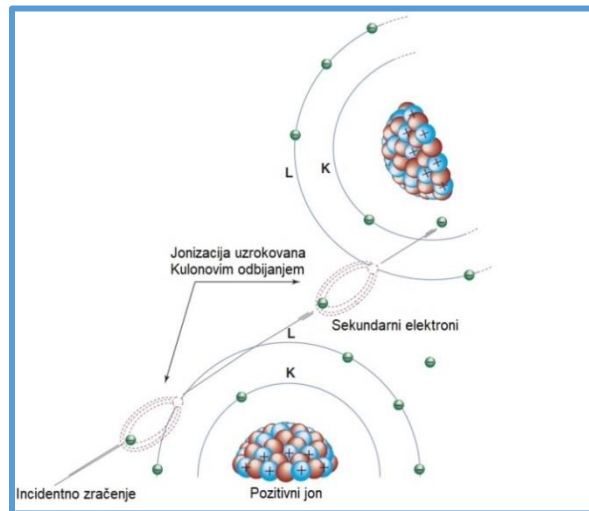
Energetske naelektrisane čestice stupaju u interakciju sa materijom pomoću električnih (tj. Kulonovih) sila i gube kinetičku energiju putem ekscitacije, jonizacije i radijacionih gubitaka. Ekscitacija i jonizacija nastaju kada naelektrisane čestice gube energiju interakcijom sa orbitalnim elektronima u medijumu. Ovi interakcijski ili kolizijski gubici odnose se na Kulonove sile koje djeluju na naelektrisane čestice pri prolasku u blizini električnog polja koje stvaraju elektroni i protoni atoma. Ekscitacija je prenos energije upadnih čestica na elektrone u materijalu, podstičući ih tako da prelaze na elektronske orbite dalje od jezgri (tj. prelaz na viši energetski nivo). U ekscitaciji, energija predana elektronu nije veća od energije veze elektrona. Nakon ekscitacije, elektron će se vratiti na niži energetski nivo, uz emisiju energije pobude u obliku elektromagnetnog zračenja ili Ožeovog elektrona. Ovaj proces se naziva deekscitacija (slika 4).





**Slika 4.** Ekscitacija (lijevo) i deekscitacija (desno) uz oslobađanje elektromagnetnog zračenja.[1]

Ako je prenesena energija veća od energije veze elektrona, dolazi do jonizacije, pri čemu se elektron izbacuje iz atoma (slika 5). Rezultat jonizacije je jonski par koji se sastoji od izbačenog elektrona i pozitivno naelektrisanog atoma. Ponekad, izbačeni elektroni posjeduju dovoljno energije da proizvedu dalju jonizaciju koja se naziva sekundarna jonizacija.[1]



**Slika 5.** Jonizacija i nastanak sekundarnih elektrona.[1]

Još jedna važna razlika između teških naelektrisanih čestica i elektrona je njihova putanja u materiji. Elektroni prate krivudave putanje u materiji kao rezultat višestrukih rasijanja izazvanih Kulonovim skretanjima (odbijanje i/ili privlačenje). S druge strane, veća masa teških naelektrisanih čestica, dovodi do gustog i obično linearnog jonizacionog traga. Dužina puta čestice je definisana kao rastojanje koje čestica pređe, a domet čestice se definiše kao dubina prodiranja čestice u materiju.

Dok specifična jonizacija predstavlja sve energetske gubitke koji nastaju prije nego što se proizvede jonski par, linearni prenos energije (*engl. Linear Energy Transfer (LET)*) je mjera prosječne količine energije deponovane lokalno (blizu putanje upadnih čestica) u apsorberu po jedinici dužine putanje. LET se često izražava u jedinicama keV ili eV/mm.

LET naelektrisane čestice je proporcionalan kvadratu naelektrisanja i obrnuto proporcionalan kinetičkoj energiji čestice tj.:

$$LET \sim \frac{Q^2}{E_k} \quad (3.1)$$

LET određenog tipa zračenja opisuje lokalnu gustinu deponovane energije, koja može imati značajan uticaj na biološke efekte izlaganja radijaciji.

Rasijanje se događa pri interakciji koja odbija česticu ili foton od prvobitne putanje. Rasijanje u kojem je ukupna kinetička energija čestice koje se sudaraju nepromijenjena, naziva se elastičnim. Kada dođe do rasijanja sa gubitkom kinetičke energije (tj. ukupna kinetička energija rasijanih čestica je manja od one prije interakcije), za interakciju se kaže da je neelastična. Na primjer, proces jonizacije se može smatrati elastičnom interakcijom ako je energija veze elektrona zanemarljiva u poređenju sa kinetičkom energijom upadnog elektrona (tj. kinetička energija izbačenog elektrona jednaka je kinetičkoj energiji koju gubi upadni elektron).[1]

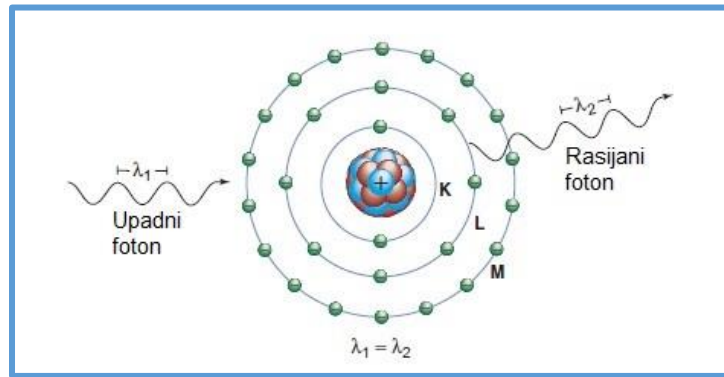
### 3.1 Interakcija x zračenja sa materijom

Pri prolasku kroz materiju, fotoni će prodrijeti bez interakcije, rasijati se ili biti apsorbirani. Postoje četiri glavna tipa interakcija rendgenskih ili gama fotona sa materijom, od kojih prva tri igraju ulogu u dijagnostičkoj radiologiji i nuklearnoj medicini:

- a) Rejljevo rasijanje,
- b) Komptonovo rasijanje,
- c) Fotoelektrični efekat i
- d) Produkcija para

#### 3.1.1 Rejljevo rasijanje

Pri Rejljevom rasijanju, upadni foton interaguje sa cijelim atomom i pobuđuje ga, za razliku od pojedinačnih elektrona kao kod Komptonovog rasijanja ili fotoelektričnog efekta (o kojima će biti riječi kasnije). Ova interakcija se dešava uglavnom sa rendgenskim zracima veoma niske energije (15 do 30 keV). Tokom Rejljevog rasijanja, električno polje elektromagnetnog talasa upadnog fotona predaje svu svoju energiju, uzrokujući da svi elektroni u rasijanom atomu osciliraju u fazi. Oblak elektrona odmah emituje ovu energiju, emitujući pri tom foton iste energije, ali u malo drugačijem pravcu (slika 6). U ovoj interakciji ne dolazi do izbacivanja elektrona iz orbite atoma, pa stoga ne dolazi do jonizacije. Uopšteno, prosječni ugao rasijanja opada kako se energija rendgenskog zraka povećava.[1]



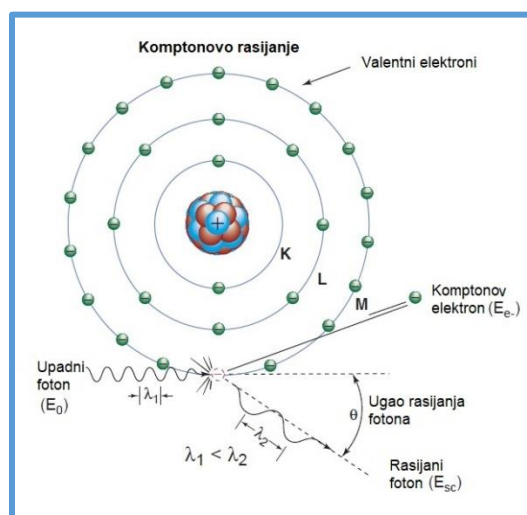
**Slika 6.** Prikaz Rejljevog rasijanja.[1]

### 3.1.2 Komptonovo rasijanje

Komptonovo rasijanje (koji se naziva i neelastično ili nekласično rasijanje) je dominantna interakcija rendgenskih ili gama fotona u dijagnostičkom energetskom opsegu sa mekim tkivom. Interakcija će se najvjerojatnije desiti između fotona i elektrona spoljašnje („valentne“) ljuske (slika 7). Elektron biva izbačen iz atoma, dok foton sa umanjenom energijom se dalje rasijava pod nekim uglom tj. skreće sa prvobitne putanje. Dakle, energija upadnog fotona ( $E_0$ ) jednaka je zbiru energije rasijanog fotona ( $E_{sc}$ ) i kinetičke energije izbačenog elektrona ( $E_{e^-}$ ), kao što je prikazano u jednačini (3.1.2.1). Energija veze elektrona koji je izbačen je relativno mala i može se zanemariti.

$$E_0 = E_{sc} + E_{e^-} \quad (3.1.2.1)$$

Komptonovo rasijanje dovodi do jonizacije atoma i podjele energije upadnog fotona, između rasijanog fotona i izbačenog elektrona. Izbačeni elektron će izgubiti svoju kinetičku energiju ekscitacijom i jonizacijom atoma u okolnom materijalu. Komptonov rasijani foton može proći kroz medijum bez interakcije ili može biti podvrgnuti naknadnim interakcijama kao što su Komptonovo rasijanje, fotoelektrični efekat ili Rejljevo rasijanje.



**Slika 7.** Prikaz Komptonovog rasijanja.[1]

Energija rasijanog fotona može se izračunati iz energije upadnog fotona i ugla (u odnosu na putanju upada) rasijanog fotona:

$$E_{sc} = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{511 \text{ keV}}(1 - \cos \theta)} \quad (3.1.2.2)$$

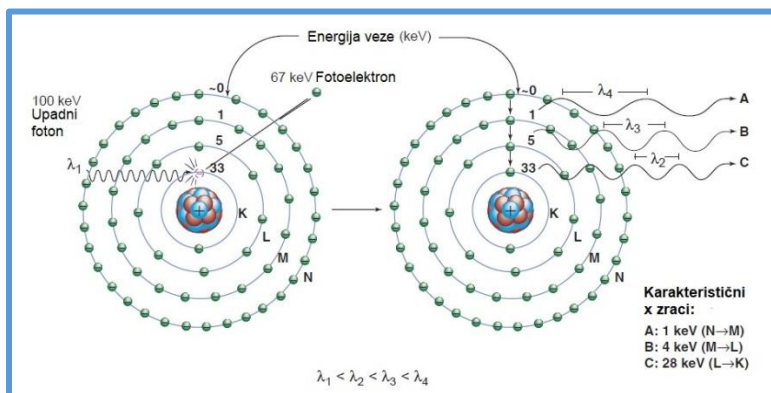
Kada se Komptonovo rasijanje dogodi pri nižim energijama rendgenskih zraka (15 do 150 keV), većina energije upadnog fotona se prenosi na rasijani foton. Na primjer, nakon Komptonove interakcije fotona od 80 keV, minimalna energija rasijanog fotona je 61 keV. Dakle, čak i sa maksimalnim gubitkom energije, rasijani fotoni imaju relativno visoke energije. Zakoni održanja energije i impulsa postavljaju ograničenja i za ugao rasijanja i za prenos energije. Na primjer, maksimalni prenos energije na Komptonov elektron se dešava pri rasijanju fotona pod uglom od 180 stepeni. U stvari, maksimalna energija rasijanog fotona je ograničena na 511 keV pri rasijanju pod uglom od 90 stepeni i na 255 keV za rasijanja pod uglom od 180 stepeni. Ova ograničenja energije rasijanih fotona važe čak i za fotone izuzetno visoke energije. Ugao rasijanja izbačenog elektrona ne može biti veći od 90 stepeni, dok ugao rasijanog fotona može biti bilo koja vrijednost uključujući rasijanje pod uglom od 180 stepeni. Za razliku od rasijanog fotona, energija izbačenog elektrona se obično apsorbira u blizini mjesta rasijanja. Energija upadnog fotona mora biti znatno veća od energije veze elektrona prije nego što dođe do Komptonove interakcije. Dakle, relativna vjerovatnoća za Komptonove interakcije raste, u poređenju sa Rejljevom rasijanjem ili fotoelektričnim efektom, kako se povećava energija upadnog fotona. Vjerovatnoća Komptonove interakcije zavisi i od gustine elektrona (broj elektrona/gr). Broj elektrona po gramu sporo opada sa masenim brojem atoma  $A$ , tako da, izuzev vodonika, ukupan broj elektrona/g je prilično konstantan za većinu materijala.[1]

### 3.1.3 Fotoelektrični efekat

U fotoelektričnom efektu, upadni foton interaguje sa atomom i svu svoju energiju predaje orbitalnom elektronu atoma, koji zatim biva izbačen. Kinetička energija izbačenog fotoelektrona ( $E_{pe}$ ) jednaka je energiji upadnog fotona ( $E_0$ ) umanjenoj za energiju veze orbitalnog elektrona ( $E_b$ ) (slika 8 lijevo).

$$E_{pe} = E_0 - E_b \quad (3.1.3.1)$$

Da bi došlo do fotoelektričnog efekta, energija upadnog fotona mora biti veća ili jednaka energiji veze orbitalnog elektrona. Na primjer, za fotone čije energije premašuju energiju veze u K-ljusci, najvjerovatnije su fotoelektrične interakcije sa elektronima K-ljuske. Nakon fotoelektrične interakcije, atom se jonizuje, a na mjestu izbačenog elektrona nalazi se šupljina. Šupljina će biti popunjena elektronom iz ljuske sa nižom energijom veze uz emisiju karakterističnog x zračenja ili Ožeevog elektrona. Što dovodi do stvaranja još jedne šupljine, koja se, popunjava elektronom iz ljuske sa još nižom energijom veze. Tako nastaje kaskada elektrona od spoljašnje ka unutrašnjoj ljusci.

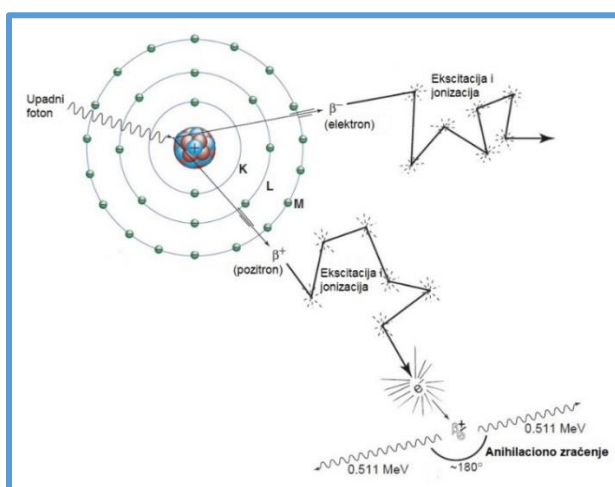


**Slika 8.** Prikaz fotoelektričnog efekta.[1]

Vjerovatnoća za emisiju karakterističnog x zračenja opada kako se atomski broj apsorbera smanjuje. Vjerovatnoća za fotoelektrični efekat po jedinici mase je proporcionalna  $Z^3/E^3$ , gde je Z atomski (redni) broj, a E energija upadnog fotona.[1]

### 3.1.4 Produkcija para

Nastanak para može se desiti samo kada energija rendgenskih ili gama fotona prelazi 1.02 MeV. Pri produkciji para, rendgenski ili gama fotoni stupaju u interakciju sa električnim poljem jezgra atoma. Energija fotona se transformiše u par elektron-pozitron (slika 9). Preostali ekvivalent mase i energije svakog elektrona je 0.511 MeV i zbog toga je energetski prag za ovu vrstu interakcije 1.02 MeV. Energija fotona iznad ovog praga se prenosi na elektron i pozitron kao kinetička energija. Elektron i pozitron gube svoju kinetičku energiju ekscitacijom i jonizacijom. Kao što je ranije diskutovano, kada se pozitron zaustavi, on stupa u interakciju sa negativno naelektrisanim elektronom, što dovodi do formiranja dva suprotno usmjerena anihilaciona fotona od 0.511 MeV (Slika 9).[1]



**Slika 9.** Prikaz proizvodnje para elektron-pozitron.[1]

## 4. Atenuacija rendgenskih zraka

Atenuacija je uklanjanje fotona iz snopa rendgenskih zraka pri prolasku kroz materiju. Atenuacija je uzrokovana i apsorpcijom i rasijanjem primarnih fotona. Mehanizmi interakcije o kojima je bilo riječi u prethodnom poglavlju, izazivaju atenuaciju snopa na različite načine. Pri niskim energijama fotona (manjim od 26 keV), fotoelektrični efekat dominira u procesima atenuacije. Međutim, kao što je ranije rečeno, vjerovatnoća fotoelektrične apsorpcije u velikoj mjeri zavisi od energije fotona i atomskog broja apsorbera. U interakcijama fotona veće energije sa materijalima sa niskim brojem Z, dominira Komptonovo rasijanje. Pri veoma visokim energijama fotona (većim od 1.02 MeV), daleko izvan opsega dijagnostičke i nuklearne radiologije, proizvodnja para doprinosi atenuaciji.[1]

### 4.1 Linearni koeficijent atenuacije

Dio fotona uklonjenih iz monoenergetskog snopa rendgenskih zraka po jedinici debljine materijala naziva se linearni koeficijent atenuacije ( $\mu$ ), obično izražen u jedinicama inverznih centimetara ( $\text{cm}^{-1}$ ). Broj fotona uklonjenih iz snopa zračenja, pri prolasku kroz apsorber veoma male debljine  $\Delta x$  može se izraziti kao:

$$n = \mu N \Delta x \quad (4.1.1)$$

gde je  $n$  broj uklonjenih fotona iz snopa, a  $N$  je broj fotona monoenergetskog snopa koji padaju na apsorber. Linearni koeficijent atenuacije je zbir pojedinačnih linearnih koeficijenata za svaku vrstu interakcije:

$$\mu = \mu_{\text{Rejljevo}} + \mu_{\text{fotoelektrični efekat}} + \mu_{\text{Komptonovo}} + \mu_{\text{proizvodnja para}} \quad (4.1.2)$$

Za datu debljinu materijala, vjerovatnoća interakcije zavisi od broja atoma sa kojima rendgenski zraci interaguju po jedinici puta. Gustina ( $\rho$ , u  $\text{g/cm}^3$ ) materijala utiče na ovaj broj. Na primjer, ako se gustina udvostruči, fotoni će interagovati sa dvostruko više atoma po jedinici puta krećući se kroz materijal. Dakle, linearni koeficijent atenuacije je proporcionalan gustini materijala, na primjer [1]:

### 4.2 Maseni koeficijent atenuacije

Za dati materijal i debljinu, vjerovatnoća interakcije je proporcionalna broju atoma po zapremeni. Ova zavisnost se može prevazići normalizacijom linearnog koeficijenta atenuacije za gustinu materijala. Linearni koeficijent atenuacije, normalizovan na jediničnu gustinu, naziva se maseni koeficijent atenuacije.[1]

Maseni koeficijent atenuacije:

$$(\mu/\rho)[\text{cm}^2/\text{g}] = \frac{\text{Linearni koeficijent atenuacije } (\mu)[\text{cm}^{-1}]}{\text{Gustina materijala } (\rho)[\text{g}/\text{cm}^3]} \quad (4.2.1)$$

### 4.3 Inherentna i dodatna filtracija rendgenskog snopa

Filtracija, proces slabljenja i otvrdnjavanja snopa rendgenskih zraka, tradicionalno se kvantifikuje u jedinicama mm aluminijuma. Filtracija koju daje sam sklop kućišta rendgenske cijevi naziva se inherentna filtracija. U slučaju standardne rendgenske cijevi, inherentna filtracija je približno 0.5 mm aluminijuma, a u cijevima posebne namjene, kao što su one za mamografiju, može biti i do približno 0.1 mm aluminijuma. Materijal koji se namjerno unosi u snop da bi se dodatno smanjilo prisustvo rendgenskih zraka niske energije u odnosu na visokoenergetske rendgenske zrake, često se naziva dodatnom filtracijom. Zbir svih materijala kroz koje rendgenski zraci moraju da prođu naziva se totalna filtracija.

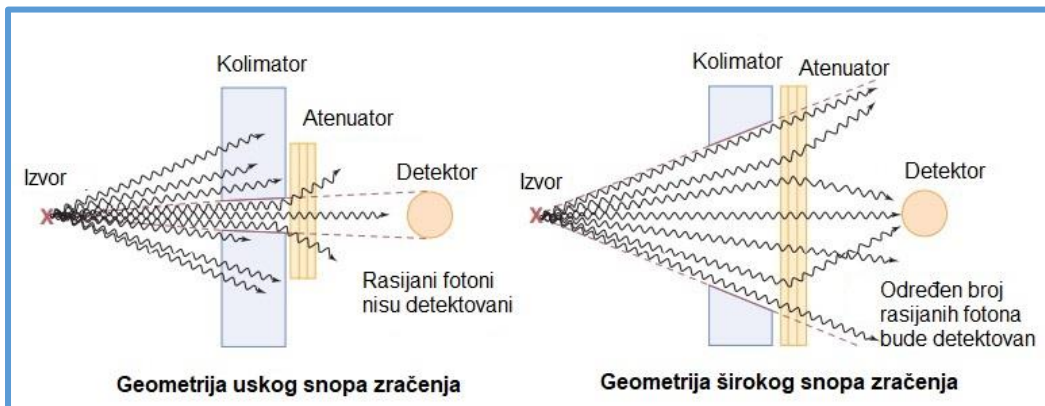
Dijelovi rendgenske cijevi koji čine inherentnu filtraciju su: prozor (otvor cijevi), kućište, rashladno ulje (ekvivalentno 0.5 – 1.0 mm aluminijuma)

Dodatnu filtraciju čine zamjenljivi metalni limovi (aluminijum, bakar, kalaj itd.). Komponente dodatne filtracije poput debljine filtera i vrste metala prilagođavaju se u zavisnosti od vrste procedure (npr. zaštita od zračenja, dijagnostička radiologija).

Filtracija smanjuje intenzitet rendgenskog zraka, ali ne i maksimalnu energiju spektra. Promjena oblika spektra snopa, sa filtracijom, se naziva otvrdnjavanje snopa o kojem će biti riječi kasnije u ovom poglavlju. Ovo je zbog gubitka fotona niže energije iz polihromatskog snopa, gdje prosječna energija rendgenskog zraka se povećava i postaje prodornija.[6]

### 4.4 HVL

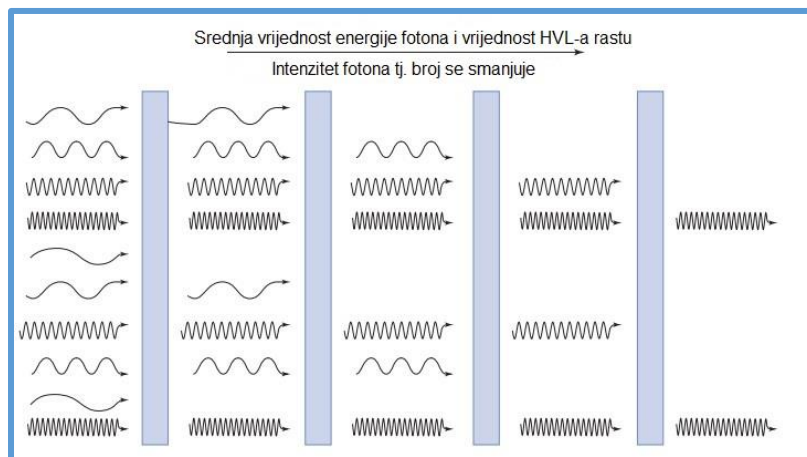
Debljina poluslabljenja (*engl. Half-value layer - HVL*) se definiše kao debljina materijala potrebnog da se intenzitet, npr. brzina kerme vazduha, rendgenskog zraka smanji na polovinu njegove početne vrijednosti. HVL polja je indirektna mjera energije fotona (koja se takođe naziva kvalitet) polja, kada se mjeri u geometriji uskog snopa zračenja (*engl. narrow beam*). Geometrija uskog snopa se odnosi na eksperimentalnu konfiguraciju koja je dizajnirana tako da rasijani fotoni budu zaustavljeni i samim tim ne budu detektovani od strane detektora (slika 10 lijevo). U geometriji širokog snopa, snop je dovoljno širok da značajan dio rasijanih fotona ostaje u snopu. Rasijani fotoni koji dopjevaju do detektora (slika 10 desno) rezultiraju različitim koeficijentom atenuacije tj. vrijednost HVL-a je veća od realne vrijednost.[1]



Slika 10. Eksperimentalna postavka geometrije uskog i širokog snopa zračenja.[1]

#### 4.5 Otvrđnjavanje snopa zračenja

Niskoenergetski fotoni polienergetskog rendgenskog snopa će biti uklonjeni iz snopa pri prolasku kroz materiju. Pomijeranje spektra rendgenskih zraka ka većim efektivnim energijama, kako snop prolazi kroz materiju naziva se otvrđnjavanjem snopa (*engl. Beam hardening*) (slika 11). Rendgen aparati uklanjaju većinu niskoenergetskog zračenja pomoću filtera, tankih ploča od aluminijuma, bakra ili drugih materijala postavljenih u snopu. Navedena dodatna filtracija će rezultirati snopom rendgenskih zraka sa većom efektivnom energijom i samim tim većim HVL-om.



Slika 11. Šematski prikaz otvrđnjavanja snopa pri prolasku rendgenskih zraka kroz materiju.[1]

Koeficijent homogenosti je odnos prvog i drugog HVL-a i opisuje polienergetski karakter polja. Prvi HVL je debljina koja smanjuje intenzitet zračenja na 50%, a drugi HVL ga smanjuje na 25% od njegove početne vrijednosti. Za većinu rendgenskih kvaliteta zračenja iz oblasti dijagnostičke radiologije, koeficijent homogenosti rendgenskog spektra je između 0.5 – 0.7. Međutim, za specijalne primjene kao što je konvencionalna projekcijska mamografija sa faktorima za poboljšanje spektralne uniformnosti rendgenskog zraka, koeficijent homogenosti može biti čak 0.97. Za rendgenske kvalitete u oblasti zaštite od zračenja koeficijent homogenosti je između 0.89 – 0.99, dok monoenergetski izvor gama zraka ima koeficijent homogenosti jednak 1.[1]



## 5. Dozimetrijske veličine i jedinice

Međunarodni sistem jedinica (SI) obezbjeđuje zajednički sistem jedinica za nauku i tehnologiju. Pored sedam osnovnih jedinica, postoje izvedene jedinice definisane kao kombinacije osnovnih jedinica. Detalji u vezi sa izvedenim jedinicama koje se koriste u mjerenju i proračunu doze zračenja za specifične primjene mogu se naći u dokumentima Međunarodne komisije za jedinice zračenja i mjerenja (ICRU) i Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (ICRP).[1]

### 5.1 Fluens, fluks i energijski fluens

Broj fotona ili čestica koji prolaze kroz jediničnu površinu poprečnog presjeka naziva se fluens i obično se izražava u jedinicama  $\text{cm}^{-2}$ . Fluens je dat simbolom  $\Phi$ .

$$\Phi = \frac{\text{Fotoni}}{\text{Površina poprečnog presjeka}} \quad (5.1.1)$$

Brzina fluensa (npr. brzina kojom fotoni ili čestice prolaze kroz jedinicu površine u jedinici vremena) naziva se fluks. Fluks, dat simbolom  $\dot{\Phi}$ , je jednostavno fluens u jedinici vremena.

$$\dot{\Phi} = \frac{\text{Fotoni}}{\text{Površina} \cdot \text{vrijeme}} \quad (5.1.2)$$

Fluks je koristan u situacijama u kojima imamo konstantan snop fotona tokom dužeg vremenskog perioda. Fluks ima jedinice  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Količina energije koja prolazi kroz jediničnu površinu poprečnog presjeka naziva se energijski fluens. Za monoenergetski snop fotona, energijski fluens ( $\psi$ ) je jednostavno proizvod fluensa ( $\Phi$ ) i energije po fotonu ( $E$ ).

$$\psi = \Phi \left( \frac{\text{Fotoni}}{\text{Površina}} \right) \times E \left( \frac{\text{Energija}}{\text{Foton}} \right) \quad (5.1.3)$$

Jedinica za  $\psi$  je energija po jedinici površine ( $\text{Jm}^{-2}$ ) ili džul po  $\text{m}^2$ . Za polienergetski spektar, ukupna energija u snopu je data tabelarno, množenjem broja fotona na svakoj energiji sa tom energijom i sabiranjem ovih proizvoda.[1]

## 5.2 Kerma

Kako snop indirektnog (nenaelektrisanog) jonizujućeg zračenja (npr. rendgenski zraci ili gama zraci ili neutroni) prolazi kroz medijum, on deponuje energiju u medijumu u procesu od dva koraka:

*Korak 1.* Energija koju nose fotoni (ili drugo indirektno jonizujuće zračenje) se transformiše u kinetičku energiju naelektrisanih čestica (kao što su elektroni). U slučaju rendgenskih, energija se prenosi fotoelektričnim efektom, Komptonovim rasijanjem, a za fotone veoma visoke energije, stvaranjem parova.

*Korak 2.* Direktno jonizujuće (naelektrisane) čestice deponuju svoju energiju u medijumu ekscitacijom i jonizacijom. U nekim slučajevima, opseg naelektrisanih čestica je dovoljno velik da deponuju svoju energiju dalje od mjesta početnih interakcija. Kerma (K) je akronim za kinetičku energiju oslobođenu u materiji.

Kerma je definisana kao kinetička energija koja se prenosi na naelektrisane čestice indirektnim jonizujućim zračenjem po jedinici mase, kao što je opisano u koraku 1 iznad. SI jedinica za Kerma je džul po kilogramu odnosno grej (Gy) ili miligrej (mGy). Za rendgenske i gama zrake, kerma se može izračunati iz masenog koeficijenta prenosa energije materijala i energijskog fluensa.

Maseni koeficijent prenosa energije dat je simbolom:

$$\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho_0}\right) \quad (5.2.1)$$

Maseni koeficijent prenosa energije je maseni koeficijent atenuacije pomnožen dijelom energije interagujućih fotona koja se prenosi na naelektrisane čestice kao kinetička energija. Kao što je gore pomenuto, deponovanje energije u materiji od strane fotona je u velikoj mjeri posljedica nastanka energetski naelektrisanih čestica u interakcijama fotona. Energija u rasijanim fotonima koji pobjegnu sa mjesta interakcije ne prenosi se na naelektrisane čestice u materiji. Štaviše, kada dođe do proizvodnje para, potrebno je da energija upadnog fotona bude 1.02 MeV, da bi se proizveo par elektron-pozitron, a samo preostala energija se daje elektronu i pozitronu kao kinetička energija. Stoga će maseni koeficijent prenosa energije uvijek biti manji od masenog koeficijenta atenuacije.

Za monoenergetski snop fotona, sa energijskim fluensom  $\psi$  i energijom E, kerma  $K_a$  je data kao

$$K_a = \psi \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho_0}\right)_E \quad (5.2.2)$$

gdje je  $\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho_0}\right)_E$  maseni koeficijent prenosa energije pri energiji E. SI jedinica energijskog fluensa je  $\text{Jm}^{-2}$ , a SI jedinica masenog koeficijenta prenosa energije mase je  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ , stoga njihov proizvod, kerma, ima jedinicu  $\text{J kg}^{-1}$  ( $1 \text{ J kg}^{-1} = 1 \text{ Gy}$ ).[1]

### 5.3 Apsorbovana doza

Veličina apsorbovana doza ( $D$ ) je definisana kao energija ( $E$ ) koju daje jonizujuće zračenje po jedinici mase ozračenog materijala ( $m$ ):

$$D = \frac{E}{m} \quad (5.3.1)$$

Za razliku od Kerme, apsorbovana doza je definisana za sve vrste jonizujućeg zračenja (tj. direktno i indirektno). Međutim, SI jedinica apsorbovane doze i kerme je ista (Gy), gdje je  $1\text{Gy} = 1\text{J kg}^{-1}$ . Starija jedinica za apsorbovanu dozu bila je *rad*. Jedan *rad* je jednak  $0.01\text{ J kg}^{-1}$ , dakle  $1\text{Gy} = 100\text{ rad}$ . Ako je energija data naelektrisanim česticama lokalno deponovana, a zakočno zračenje koje stvaraju energetski elektroni zanemarljivo, apsorbovana doza će biti jednaka kermi. Za rendgenske ili gama zrake, apsorbovana doza se može izračunati pomoću masenog koeficijenta apsorpcije energije i energijskog fluensa snopa.

Maseni koeficijent prenosa energije koji je gore razmotren opisuje dio masenog koeficijenta apsorpcije, koji doprinosi početnoj kinetičkoj energiji elektrona u maloj zapremini apsorbera. Maseni koeficijent apsorpcije biće isti kao i maseni koeficijent prenosa enegije kada se sva prenesena energija lokalno apsorbuje. Međutim, energetski elektroni mogu naknadno da proizvedu zakočno zračenje (x zrake), koje može pobjeći iz male zapremine od interesa. Dakle, maseni koeficijent apsorpcije može biti nešto manji od masenog koeficijenta prenosa energije.

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho_0}\right) \cong \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho_0}\right) \quad (5.3.2)$$

Razlika između kerme i doze je mala za relativno niske energije rendgenskog zračenja. Doza u bilo kom materijalu je data kao:

$$D = \psi \left(\frac{\mu_{en}}{\rho_0}\right)_E \quad (5.3.3)$$

Razlika između izračunavanja kerme i doze za vazduh je u tome što se kerma definiše korišćenjem masenog koeficijenta prenosa energije, dok se doza definiše korišćenjem masenog koeficijenta apsorpcije. [1]

### 5.4 Ekspozicija

Količina naelektrisanja ( $Q$ ) proizvedenog jonizujućim elektromagnetnim zračenjem po masi ( $m$ ) vazduha predstavlja Ekspoziciju ( $X$ ):

$$X = \frac{Q}{m} \quad (5.4.1)$$

Ekspozicija se izražava u jedinicama naelektrisanja po masi, odnosno kulonima po kg ( $\text{C kg}^{-1}$ ). Istorijska jedinica ekspozicije je rendgen (skraćeno R), koji se definiše kao

$$1\text{ R} = 2.58 \times 10^{-4}\text{ C kg}^{-1}$$

Snop zračenja se često predstavlja kao jačina ekspozicije (R/h ili mR/min). Radijacioni izlaz (*engl. output*) rendgenske mašine se može mjeriti i izraziti kao ekspozicija (R) po jedinici trenutnog vremena trajanja ekspozicije (miliamper sekunda ili mAs) pod određenim operativnim uslovima (npr. 5 mR/mAs na 70 kV za rastojanju izvor - detektor od 100 cm i sa filtracijom rendgenskog snopa ekvivalentnom 2 mm Al). Ekspozicija je korisna veličina jer se jonizacija može direktno mjeriti detektorima zračenja ispunjenim vazduhom. Količina ekspozicije je ograničena tako što se odnosi samo na interakciju jonizujućih fotona (nenaelektrisano zračenje) u vazduhu. Ekspozicija se može izračunati iz doze u vazduhu. Neka je odnos doze (D) i ekspozicije (X) u vazduhu jednak W i zamjenivši u gornjim izrazima D i X prinose dobijamo:

$$W = \frac{D}{X} = \frac{E}{Q} \quad (5.4.2)$$

W, prosječna energija deponovana po paru jona u vazduhu, je približno konstantna kao funkcija energije. Vrijednost W je 33.85 eV/jonskom paru ili 33.85 J/C. U smislu tradicionalne jedinice ekspozicije, rendgen, doza u vazduhu je [1]:

$$K_{air} = W \times X \left( \frac{2.58 \times 10^{-4} C}{kg \cdot R} \right) \quad (5.4.3)$$

ili

$$K_{air}(Gy) = 0.00873 \left( \frac{Gy}{R} \right) \times X \quad (5.4.4)$$

## 5.5 Ekvivalentna doza

Ne izazivaju sve vrste jonizujućeg zračenja isto biološko oštećenje po jedinici apsorbovane doze. Da bi se modifikovala doza tako da odražava relativnu efikasnost određene vrste zračenja u stvaranju biološkog oštećenja, ICRP je uspostavio težinski faktor zračenja ( $w_R$ ) kao dio cjelokupnog sistema za zaštitu od zračenja. Proizvod apsorbovane doze (D) i težinskog faktora određene vrste zračenja na ljudsko tkivo je ekvivalentna doza (H).

$$H = D \cdot w_R \quad (5.5.1)$$

Jedinica SI za ekvivalentnu dozu je džul po kilogramu odnosno svert (Sv), gde je  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ . Zračenja koja se koriste u dijagnostičkom snimanju (rendgenski ili gama zraci), kao i energetski elektroni koji se pokreću kada ovi fotoni stupaju u interakciju sa tkivom ili kada se emituju elektroni tokom radioaktivnog raspada, imaju  $w_R$  od 1: dakle,  $1 \text{ mGy} \times 1 (w_R) = 1 \text{ mSv}$ . Za teško naelektrisane čestice kao što su alfa čestice, LET je mnogo veći, a samim tim i biološka oštećenja i odgovarajući  $w_R$  su mnogo veći (Tabela 1).

**Tabela 1.** Vrijednosti radijacionog težinskog faktora za različite vrste zračenja

Vrste zračenja	Radijacioni težinski faktor $w_R$
x zraci, $\gamma$ zraci, $\beta$ čestice i elektroni	1
Protoni	2
Neutroni (zavisno od energije)	2.5 - 20
$\alpha$ čestice, fragmenti fisije i teška jezgra	20

Starija jedinica za ekvivalentnu dozu je rem.

Sivert je jednak 100 rem, a 1 rem je jednak 10 mSv.[3]

## 5.6 Efektivna doza

Biološka tkiva se razlikuju po osjetljivosti na efekte jonizujućeg zračenja. ICRP je takođe ustanovio težinske faktore tkiva ( $w_T$ ) kao dio svog sistema zaštite od zračenja, kako bi određenom organu ili tkivu (T) dodijelio postotak štete koji su rezultat zračenja tog tkiva u poređenju sa uniformnim zračenjem cijelog tijela (*ICRP Publication 103, 2007*). Ovi težinski faktori tkiva prikazani su u tabeli 2.

**Tabela 2.** Vrijednosti težinskih faktora za pojedina tkiva i organe

Organ/tkivo	Težinski faktor tkiva $w_T$
Gonade	0.20
Koštana srž	0.12
Debelo crijevo	0.12
Pluća	0.12
Stomak	0.12
Bešika	0.05
Dojka	0.05
Jetra	0.05
Jednjak	0.05
Tiroidna žljezda	0.05
Koža	0.01
Kost (površina)	0.01
Ostalo	0.05

Suma proizvoda ekvivalentne doze za svaki ozračeni organ ili tkivo ( $H_T$ ) i odgovarajućeg težinskog faktora ( $w_T$ ) za taj organ ili tkivo naziva se efektivna doza (E).

$$E(Sv) = \sum_T [w_T \times H_T(Sv)] \quad (5.6.1)$$

Efektivna doza je izražena u istim jedinicama kao i ekvivalentna doza (sivert ili rem). Efektivna doza je veličina koja ne zavisi od pola ili starosti čovjeka.[3]

## 5.7 Operativne fizičke veličine – dozni ekvivalent

Ekvivalentna i efektivna doza nisu direktno mjerljive veličine, ICRU je definisao niz operativnih veličina u svrhe zaštite od zračenja, u koje spadaju ambijentalni i lični ekvivalent doze.[3]

### 5.7.1 Ambijentalni dozni ekvivalent $H^*(10)$

Ambijentalni dozni ekvivalent je veličina koja je povezana sa efektivnom dozom i uopšteno se koristi za buduće procjene, kategorizaciju radnih prostora, provjeru učinkovitosti debljine zaštite i slično.  $H^*(10)$  je izotropna veličina čija vrijednost ne zavisi od smjera raspodjele polja zračenja u posmatranoj tački i predstavlja ekvivalent doze koja bi se mjerila na dubini 10 mm u ICRU sferi, koja je postavljena suprotno od pravca upadnog zračenja. Po definiciji, ICRU sfera je fantom (sferni) prečnika 30 cm, gustine 1 g/cm<sup>3</sup>, sastavljena od tkivu ekvivalentnog materijala definisanog sastava (76.2 % kiseonika, 11.1 % ugljenika, 10.1 % vodonika i 2.6% azota). [3]

### 5.7.2 Lični dozni ekvivalent $H_p(d)$

Definisan je kao dozni ekvivalenti za meko tkivo (za četveroelementno ICRU tkivo) na dubinama od 10 mm, 3 mm i 0.07 mm, u tijelu ispod definisane tačke na površini tijela. Dubine su najčešće od  $d = 10$  mm za fotonske energije iznad 15 keV, a  $d = 0.07$  mm i  $d = 3$  mm za manje prodorna zračenja ispod 15 keV i  $\beta$ -zračenje (kožna doza, doza na očno sočivo).  $H_p(d)$  se mjeri dozimetrima koji se nose na površini tijela i prekriveni su odgovarajućim slojem tkivu ekvivalentnog materijala, a izražava se u Sv.[3]

## 6. Instrumenti za mjerenje zračenja – Dozimetri

Svi detektori jonizujućeg zračenja, koji direktno ili indirektno mjere ekspozicionu dozu, kermu, apsorbovanu dozu ili druge veličine, zahtijevaju interakciju zračenja sa materijom. Jonizujuće zračenje deponuje energiju u materiji jonizacijom i ekscitacijom. Kako je prethodno objašnjeno, jonizacija predstavlja izbijanje elektrona iz atoma ili molekula (atom ili molekul bez elektrona ima neto pozitivno naelektrisanje i naziva se kation. Ekscitacija je prelazak elektrona u pobuđena stanja u atomima, molekulima ili kristalu. Ekscitacija i jonizacija mogu izazvati hemijske promjene ili emisiju vidljive svjetlosti ili ultraljubičastog (UV) zračenja. Većina energije deponovane jonizujućim zračenjem se na kraju pretvara u toplotnu energiju.

Dozimetar zajedno sa svojim čitačem predstavlja mjerni sklop koji se još naziva i dozimetrijski sistem. Jedan dozimetrijski sistem sastoji se od:

- detektora
- mjernog uređaja tj. elektrometra

Idealne osobine koje bi detektor jonizujućeg zračenja trebao da ima su:

- a) Visoka tačnost i preciznost – Tačnost mjerenja je bliskost pravoj vrijednosti ili prihvaćenoj referentnoj vrijednosti, a preciznost je bliskost očitavanja ponovljenih mjerenja u istim ili sličnim uslovima i ogleda se u maloj standardnoj devijaciji distribucije rezultata merenja.
- b) Linearnost signala. Linearnost će zavistiti od tipa dozimetra i njegovih fizičkih karakteristika. Svaki dozimeter na određenom opsegu postiže linearnost sa dozom, gdje nakon toga nastaje nelinearnost.
- c) Mala zavisnost od jačine doze. Dozimetrijski sistem koji mjeri dozu, treba biti nezavisan od jačine doze tj. odgovor sistema treba da je konstantan.
- d) Nezavisan od energije upadnog snopa. Odgovor dozimetrijskog sistema, u idealnim uslovima, na promjenu energije treba da ostane nepromjenjen.
- e) Nezavisnost od pravca snopa. Zbog konstrukcije, energije i fizičkih dimenzija snopa može se javiti zavisnost od pravca upadnog snopa i igra važnu ulogu u *in vivo* dozimetriji. Dozimetri za kalibraciju snopa se uglavnom i koriste u istoj geometriji u kojoj su i kalibrisani.
- f) Prostorna rezolucija. U snopu zračenja dozimeter mjeri dozu u jednoj tački u prostoru i trebalo bi da očitavanje doze bude u maloj zapremini. Na primjer termoluminescentni dozimetri su malih dimenzija i pogodni za mjerenja u jednoj tački, dok jonizacione komore su većih dimenzija ali sa potrebnom osjetljivošću.
- g) Ponovljivost. Tipovi detektora poput jonizacionih komora i poluprovodničkih detektora mogu se ponovo koristiti, bez promjena osjetljivosti u slučaju komora ili sa postepenim gubitkom osjetljivosti kod poluprovodničkih detektora. Sa druge strane filmovi, gel, alanin ne mogu se ponovo koristiti.

Izbor dozimetra koji će se koristiti za mjerenje zavisi od same primjene, kao i od uslova u kojima se mjerenje vrši. Sistem za mjerenje može biti aktivni (direktni) i pasivni (indirektni). Dozimetri kao što su TLD ili OSL nazivaju se „pasivnim“ jer ne daju direktna očitavanja i mogu da rade bez ikakvih aktivnih sredstava. Izmjerena doza se obično uzima kao procjena efektivne doze koja se bilježi i izvještava nakon evaluacije.

Aktivni dozimeter se takođe naziva elektronski, operativni ili alarmni dozimeter. Obezbjeduje direktan prikaz akumulirane doze kao i neke dodatne funkcije kao što su podešavanja praga alarma za vrijednosti doze ili brzine doze. Pored toga, obezbjeđuje zvučnu i vizuelnu indikaciju nivoa doze. Jonizacione komore su aktivni (direktni) sistem za mjerenje.[3]

## 6.1 Vrste dozimetara

Detektori zračenja se mogu klasifikovati prema metodi detekcije. Detektor ispunjen gasom se sastoji od gasne zapremine između dvije elektrode.

Interakcija jonizujućeg zračenja sa određenim materijalima proizvodi ultraljubičasto zračenje i/ili vidljivu svjetlost. Ovi materijali se nazivaju scintilatori i obično su povezani sa uređajima koji pretvaraju UV zračenje i svjetlost u električni signal. Fotografski filmovi se koriste za snimanje svjetlosti koju emituju scintilatori.

Poluprovodnički detektori su posebno čisti kristali silicijuma, germanijuma ili drugih poluprovodničkih materijala koji su dopirani sa određenom količinom atoma primjesa tako da djeluju kao diode. Dioda je elektronski uređaj sa dva terminala koji dozvoljava velik protok struje kada se napon primijeni u jednom smjeru, ali vrlo mali kada se napon primijeni u suprotnom smjeru. Kada se koristi za detekciju zračenja, napon se primjenjuje u pravcu u kome teče mala struja. Kada dođe do interakcije u kristalu, elektroni prelaze u pobuđeno stanje, omogućavajući trenutnom impulsu električne struje da teče kroz uređaj.

Detektori, kao što su Geiger-Mueller (GM) detektori, koji ukazuju na broj interakcija koji se javljaju u detektoru nazivaju se brojači. Detektori koji daju informacije o distribuciji energije upadnog zračenja, kao što su NaI scintilacioni detektori, nazivaju se spektrometri, dok detektori koji pokazuju neto količinu deponovane energije višestrukim interakcijama, nazivaju se dozimetri.[4]

### 6.1.1 Gasni detektori

U uobičajenoj upotrebi su tri tipa gasnih detektora - jonizacione komore, proporcionalni brojači i GM brojači. Tip detektora je određen prvenstveno naponom koji se primjenjuje između dvije elektrode. U jonizacionoj komori, dvije elektrode, poznate kao anoda i katoda mogu imati skoro bilo koju konfiguraciju: mogu biti dvije paralelne ploče, dva koncentrična cilindra ili žica unutar cilindra. U proporcionalnim brojačima i GM brojačima, anoda mora biti tanka žica. [4]

Jonizaciona komora mjeri naelektrisanje na osnovu broja jonskih parova stvorenih u gasu izazvanih upadnim zračenjem. Potencijalna razlika se primjenjuje između elektroda da bi se stvorilo električno polje u gasu. Kada se atomi ili molekuli gasa između elektroda jonizuju, stvaraju se jonski parovi, gdje rezultujući pozitivni joni i disocirani elektroni se kreću do elektroda suprotnog polariteta pod uticajem električnog polja. Što generiše jonizacionu struju koja se mjeri pomoću elektrometra. Elektrometar mora biti sposoban da izmjeri veoma malu izlaznu struju, koja je u opsegu od femtoampera do pikoampera, u zavisnosti od dizajna komore, doze zračenja i primjenjenog napona. Svaki stvoren jonski par deponuje naelektrisanje na ili sa elektrode, tako da je akumulirani naboj proporcionalan broju stvorenih jonskih parova, a samim tim i dozi zračenja. Električno polje između elektroda je dovoljno jako da omogući uređaju da radi neprekidno, sprečavajući rekombinaciju jonskih parova koja bi



umanjila struju jona. Ovaj način rada se naziva „strujni“ režim, što znači da je izlazni signal kontinuirana struja, a ne impuls kao kod GM ili proporcionalnih brojača. Pošto je broj proizvedenih jonskih parova proporcionalan energiji upadnog zračenja, ova kontinuirano mjerena struja je proporcionalna brzini doze (energija deponovana po jedinici vremena) u jonizacionoj komori. [4]

Tipovi jonizacionih komora koje su u čestoj upotrebi u dozimetrijskim laboratorijama bili bi:

- Sferne i cilindrične jonizacione komore i
- Plan-paralelne jonizacione komore

Sferne i cilindrične jonizacione komore dolaze od različitih proizvođača kao i u različitim zapreminama. Sferne se proizvode sa zapreminama od  $10\text{ cm}^3$  do  $10^4\text{ cm}^3$ , a cilindrične obično od  $0.1\text{ cm}^3$  do  $1\text{ cm}^3$ . Spoljašnji omotač ovih komora napravljen je od materijala sa niskim Z, kao što je grafit. Centralna elektroda napravljena je od aluminijuma, a i spoljni zid komora takođe predstavlja elektrodu (slika 12).[5]



**Slika 12.** Na lijevoj strani sferna jonizaciona komora proizvođača PTW tip TM 32002 zapemine  $10^3\text{ cm}^3$ , a na desnoj cilindrična komora proizvođača PTW tip TM 23331 zapemine  $1\text{ cm}^3$ . [5]

Plan paralelene komore konstruisane su od dva ravna zida. Prednji zid koji je ujedno i ulazni prozor, predstavlja polarizacionu elektrodu, a zadnji zid predstavlja kolektujuću elektrodu sa sigurnosnim prstenom. Ovi tipovi jonizacionih komora obično se koriste u dozimetriji sa snopovima elektrona nižih energija ( manje od  $10\text{ MeV}$ ). Također, se mogu koristiti i za mjerenja doze pri površini i u build up regiji za ftonske snopove. Karakteristike kao i način upotrebe plan paralelnih jonizacionih komora detaljno je opisan u pravilnicima TRS 381 i TRS 398.



**Slika 13.** Primjer plan paralelne jonizacione komore proizvođača PTW tip TM 34069 zapemine  $6\text{ cm}^3$ . [5]

## 7. Rendgen aparati u dozimetrijskim laboratorijama

Kalibracioni rendgen smješten je u kalibracionoj prostoriji sa propisanim dimenzijama i debljinom zidova, dok su prateći rendgenski visokonaponski transformator i izmjenjivač toplote (sistem za cirkulaciju vode) smješteni u drugoj sobi.[1]

Uređaj se sastoji od sljedećih glavnih komponenti:

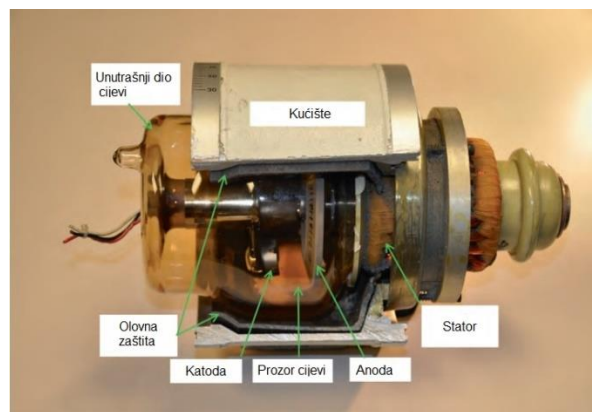
- Jedinica podrške za rendgensku cijev
- Jedinica za kontrolu polja zračenja
- Jedinica podrške za monitorsku komoru
- Jedinica za filtraciju

### 7.1 Rendgenska cijev

Komponente cijevi (slika 14) su:

- katoda,
- anoda,
- rotor/stator,
- stakleni ili metalni omotač,
- cijevni priključak,
- utičnice za kablove i kućište cijevi

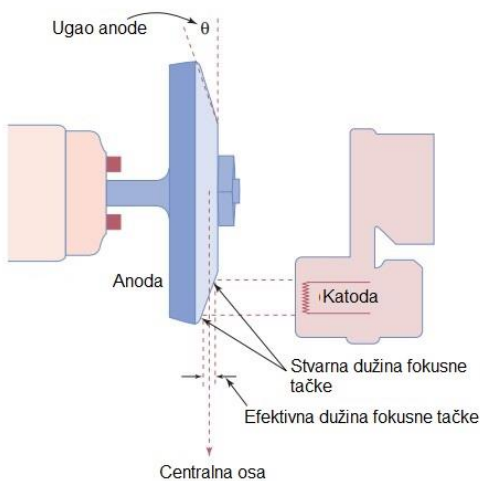
Kao što je ranije pomenuto katoda je izvor elektrona, a anoda je meta elektrona. Rendgenski zraci nastaju unutar rendgenske cijevi, kada visokoenergetski elektroni interaguju sa materijom, pretvarajući dio svoje kinetičke energije u elektromagnetno zračenje.



**Slika 14.** Prikaz dijelova rendgenske cijevi.[1]

Visokonaponski generator rendgena omogućava dotok struje rendgenskoj cijevi i dozvoljava podešavanje napona cijevi, struje cijevi i vremena ekspozicije. U zavisnosti od vrste procedure, napon rendgenske cijevi se podešava na vrijednosti od 40 do 150 kV za kvalitete iz oblasti dijagnostičke radiologije, od 25 kV do 400 kV za kvalitete iz oblasti zaštite od zračenja i od 25 do 40 kV za mamografiju. Struja rendgenske cijevi, mjerena u miliamperima (mA), proporcionalna je broju elektrona u sekundi koji teku od katode do anode.

Anodni ugao se definiše kao ugao površine mete u odnosu na centralni zrak (centralna osa) u polju rendgenskih zraka (slika 15). Ugao anode u dijagnostičkim rendgenskim kvalitetima i u oblasti zaštite od zračenja se obično kreću od 15 do 40 stepeni, a oko 20 stepeni za mamografiju. Glavni faktori na koje utiče anodni ugao su efektivna veličina fokusne tačke, output rendgena i pokrivenost polja na datoj fokusnoj tački do detektora.



**Slika 15. Poprečni prikaz anode i katode.[1]**

Stvarna veličina fokusne tačke je površina na anodi koju udaraju elektroni, a prvenstveno je određena dužinom katodnog filameta i širinom preseka čašice za fokusiranje. Dakle, efektivna i stvarna dužina fokusne tačke su geometrijski povezane kao

$$\text{Efektivna fokusna daljina} = \text{Stvarna fokusna daljina} \times \sin \theta$$

gde je  $\theta$  anodni ugao.

*Heel efekat* se odnosi na smanjenje intenziteta snopa zračenja prema anodnoj strani rendgenskog polja, uzrokovano od strane same anode. Heel efekat je manje izražen sa većom udaljenosti od izvora do detektora.

*Kolimatori* služe za prilagođavanje veličine i oblika rendgenskog polja koje izlazi iz prozora cijevi. Kolimatorski sklop je obično pričvršćen za kućište cijevi blizu prozora cijevi.[1]

## 7.2 Profil rendgenskog snopa

Raspodjela doze duž pravaca koji su normalni na osu snopa predstavlja profil snopa. Profil radijacionih polja u dozimetrijskim laboratorijama se mjeri na primjer pomoću jonizacione komore tipa PTW Farmer 0.6 cm<sup>3</sup> i elektrometra. Ova postavka koristi se za skeniranje polja u vodoravnoj i okomitoj ravni na udaljenosti od 100 cm od fokusa cijevi. Referentna tačka snopa je definisana kao presjek ose snopa zračenja i referentne ravni za datu udaljenost. Referentna ravan komore treba da bude okomita na centralnu osu polja.

Veličina polja određuje se na osnovu vrijednosti koje se dobijaju mjerenjima u blizini granice snopa koju definiše izodozna linija na 50 % maksimuma jačine doze, a homogeni dio snopa na 95 % maksimuma jačine doze. Za procjenu veličine polja i homogenosti na određenoj udaljenost koristi se model srednjeg profila radijacionog polja proračunatog na bazi rezultata mjerenja po objema osama (x i y).

Na osnovu profila snopa uradi se proračun za simetriju snopa, koja predstavlja razliku u dozi između bilo koje dvije tačke koje su jednako udaljene od centralne ose.

## 8. Mjerenja i rezultati

Master rad je bio podjeljen u nekoliko zadataka i kako je pomenuto u uvodu, cilj je bio analizirati zahtjeve objavljene verzije standarda ISO 4037-1 iz 2019. godine. Na samom početku bilo je potrebno provjeriti tabelu (slika 16) zahjeva za referentna polja x zračenja koja se nalazi u standardu.

Table 13 — Summary of the requirements for reference X radiation fields

Characteristic	Limit of variation of characteristic for	
	matched ref. radiation field	characterized ref. radiation field
Measurement of tube potential	Calibrated resistor chain	
Protective resistor in tube housing	0 $\Omega$ or measured and considered for tube potential measurement, see 4.2.2	
Deviation of mean value of the tube potential during irradiation from nominal value	0,2 % to 5 %, see values in Table 7	
Uncertainty ( $k = 2$ ) of the tube potential	0,2 % to 5 %, see values of Table 7	
Stability of the tube potential, $U$	0,2 % to 5 %, see values of Table 7	
Ripple of the generating potential, $U$	0,4 % to 10 %, see twice the values of Table 7	
Material of X-ray tube anode	Tungsten (W)	
Angle of target of the X-ray tube	20° for $U \leq 30$ kV and 15° to 40° for $U > 30$ kV	$\geq 7^\circ$ , for angles from 7° to below 20°, the heel effect shall be considered
Material of X-ray tube window for reference X radiation qualities with 1 mm Be nominal inherent filtration	Beryllium (Be)	Beryllium (Be)
Thickness of X-ray tube window for reference X radiation qualities with 1 mm Be nominal inherent filtration	$\leq 1$ mm, see 4.2.3, for deviations see Table 8	$\leq 4$ mm, see 4.2.3
Material of X-ray tube window for reference X radiation qualities with 4 mm Al nominal inherent filtration	Beryllium (Be)	Preferably Beryllium (Be) or aluminium (Al)
Thickness of X-ray tube window for reference X radiation qualities with 4 mm Al nominal inherent filtration	$\leq 10$ mm, see 4.2.3	$\leq 10$ mm Be or $\leq 1,5$ mm Al, see 4.2.3
Inherent filtration	Adjusted to 1 mm Be or 4 mm Al, see 4.2.3	Adjusted as far as possible to 1 mm Be or 4 mm Al, see 4.2.3
Filtration, material purity	See Table 10, upper limit for surface density of impurities between 0,3 % and 1 % for aluminium of thickness up to 3 mm and between 1 % and 5 % for tin and lead of all thicknesses	
Deviation of mean filter thickness from nominal value	$\leq 2$ % to $\leq 10$ %, see Table 11	$\leq 10$ %
Field diameter	Sufficient to irradiate the complete dosimeter or phantom, see 4.3.1	
Field uniformity	Better than 5 %, see 4.3.2	
Scattered radiation	Less than 5 %, see 4.3.3	

Slika 16. Prikaz tabele zahtjeva za referentna polja x zračenja

Kao što je prikazano u tabeli zahtjevi nisu isti za karakterisana referentna radijaciona polja i usklađena referentna radijaciona polja. Laboratorija (LMRI) je uspostavila usklađeno referentno polje x zračenja i shodno tome bilo je dozvoljeno da se koriste dozimetrijski konverzioni koeficijenti dati standardom.

Karakteristike uzemljene metalno-keramičke rendgenske cijevi MCN 165, koja je korištena za rad, date specifikacijama bile su:

- Maksimalni napon cijevi je 160 kV
- Anoda od volframa
- Anodni ugao jednak 22°
- Debljina prozora cijevi: 1 mm berilijuma
- Maksimalna vrijednost struje cijevi: 40 mA
- Minimalna vrijednost struje cijevi: 0.01 mA

Prema zahtjevima standarda ukupnu filtraciju za rendgenske kvalitete iz oblasti zaštite od zračenja, N serije (N-40 do N-400), čine inherentna filtracija, dodatna filtracija data standardom i aluminijumski filteri, koji su dodati kako bi ukupna inherentna filtracija bila jednaka 4 mm aluminijuma i određuje se pri naponu cijevi od 60 kV. Aluminijumski filteri postavljaju se iza dodatne filtracije (dalje od prozora rendgenske cijevi), kako bi se redukovalo fluorescentno zračenje od dodatne filtracije. Dodatna filtracija rendgenskih kvaliteta, koji su korišteni pri radu u LMRI, prikazani su u tabeli 3.

**Tabela 3. Debljina dodatne filtracije za kvalitete N serije u LMRI**

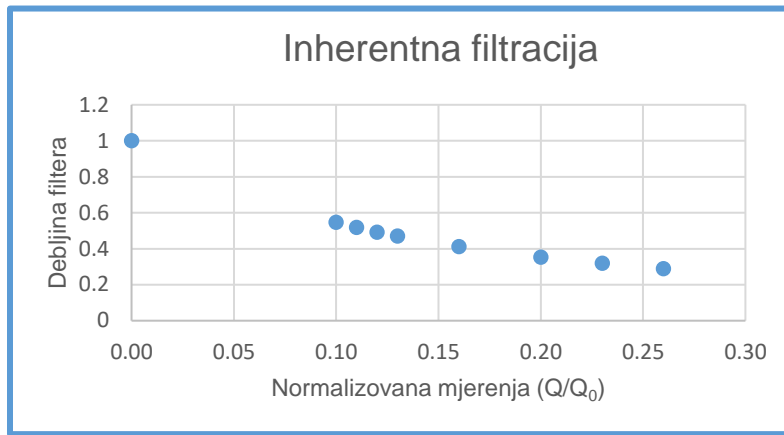
Radijacioni kvalitet	Napon cijevi (kV)	Debljina dodatne filtracije prema ISO 4037-1:2019		Debljina dodatne filtracije u LMRI		Razlika u debljini dodatne filtracije u odnosu na ISO	
		Cu (mm)	Sn (mm)	Cu (mm)	Sn (mm)	Cu (%)	Sn (%)
N-40	40	0.21		0.20		-4.80	
N-60	60	0.60		0.60		0.00	
N-80	80	2.00		2.00		0.00	
N-100	100	5.00		5.20		4.00	
N-120	120	5.00	1.00	5.00	1.00	0.00	0.00
N-150	150		2.50		2.50		0.00

Kao što se vidi u tabeli 3 devijacija debljine dodatne filtracije radijacionih kvaliteta u LMRI u odnosu na standard ISO 4037-1:2019, manja je od 5% što je u skladu sa preporukama standarda koje su navedene u tabeli 11.

Prema uputama standarda određena je inherentna filtracija sa 4 mm Al nominalne inherentne filtracije, mjerenjem HVL-a, pomoću cilindrične jonizacione komore PTW TM 23331 i elektrometra PTW UNIDOS 10001. Rezultati mjerenja prikazani su u tabeli 4, a na grafiku 1 zavisnost normalizovanih mjerenja od debljine filtera.

**Tabela 4. Rezultati mjerenja HVL-a pri određivanju inherentne filtracije**

Udaljenost komore od fokusa cijevi (mm)	Jačina struje cijevi (mA)	Debljina filtracije (mm)	Mjerenja Q (nC)	$k_{TP}$	Korigovana mjerenja $Q_{kor}$ (nC)	Normalizovana mjerenja ( $Q/Q_0$ )	$(Q_0/Q)$	$\ln(Q_0/Q)$
1200	5	0.00	3.08	1.010	3.11	1.000	1.000	0
		0.10	1.68	1.010	1.70	0.547	1.829	0.604
		0.11	1.60	1.008	1.61	0.518	1.932	0.658
		0.12	1.52	1.009	1.53	0.492	2.033	0.709
		0.13	1.45	1.010	1.46	0.469	2.130	0.756
		0.16	1.27	1.009	1.28	0.412	2.430	0.888
		0.20	1.09	1.009	1.10	0.354	2.827	1.039
		0.23	0.98	1.009	0.99	0.318	3.141	1.145
		0.26	0.89	1.009	0.90	0.289	3.456	1.240



**Grafik 1.** Prikaz zavisnosti normalizovanih mjerenja od debljine filtracije

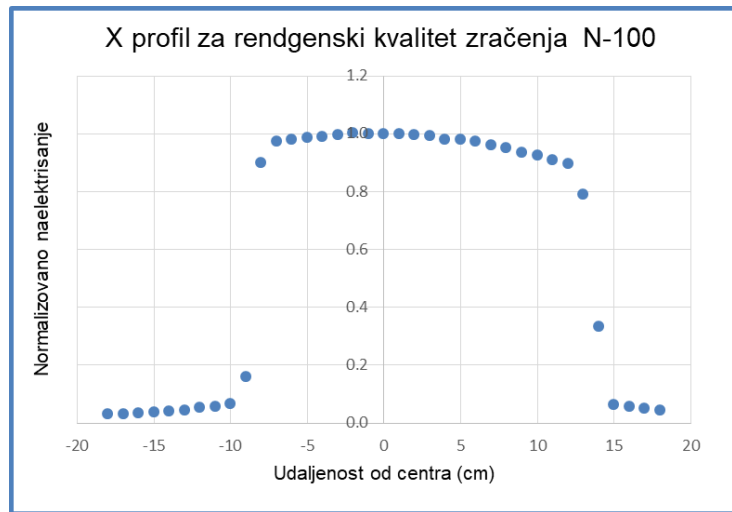
Na osnovu Forecast funkcije izračunato je da je HVL = 0.12 mm aluminijuma i ekstrapolacijom vrijednosti datih u tabeli u standardu ISO 4037-1:2019 (slika 17) dobijemo da je razlika između nominalna 4 mm aluminijuma i izračunate vrijednosti, 0.04 mm aluminijuma, tj. postignuta je inherentna filtracija od 4 mm aluminijuma.

Table 9 — Inherent filtration		Table 9 (continued)	
First HVL mm Al at 60 kV	Inherent filtration mm Al	First HVL mm Al at 60 kV	Inherent filtration mm Al
0,33	0,25	2,11	2,5
0,38	0,3	2,35	3
0,54	0,4	2,56	3,5
0,67	0,5	2,75	4
0,82	0,6	2,94	4,5
1,02	0,8	3,08	5
1,15	1	3,35	6
1,54	1,5	3,56	7
1,82	2		

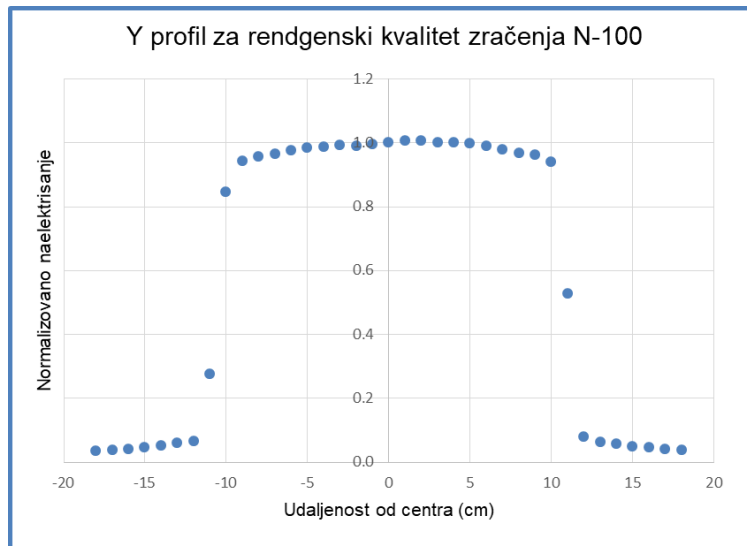
NOTE Results used were obtained from Reference [20].

**Slika 17.** Tabela 9 standarda ISO 4037-1:2019 za računanje inherentne filtracije

Na osnovu mjerenja profila polja x zračenja za kvalitet N-100, izračunat je dijametar polja, homogenost i simetrija. Mjerenja su rađena cilindričnom jonizacionom komorom tipa PTW TM 23331 i elektrometrom PTW UNIDOS 10001 na udaljenosti od 1m od fokusa cijevi pri referentnim ambijentalnim uslovima. Rezultati mjerenja prikazani su na graficima 2 i 3.



**Grafik 2.** Profil polja zračenja: za x osu



**Grafik 3.** Profil polja zračenja: za y osu

Na način kako je opisano u potpoglavlju 7.2 veličina polja u ovom slučaju bila je jednaka 21.47 cm, dok je od toga homogeni dio polja bio jednak 16.28 cm. Simetrija snopa na udaljenosti od 1m od fokusa zračenja bila je jednaka 1.21 cm. Također moguće je primijetiti na grafiku 2, za profil polja na x osi, prisustvo Heel-ovog efekta.

Jonizacione komore, koje su već ranije navedene u potpoglavlju 6.1.1, a koje su se koristile pri mjerenjima su:

- Jedno-litarska sferna jonizaciona komora PTW TM 32002
- Cilindrična jonizaciona komora PTW TM 23331
- Plan-paralelna jonizaciona komora PTW TM 34069

i elektrometar PTW UNIDOS 10001. Sferna jonizaciona komora PTW TM 32002 je referentni etalon LMRI, koja je kalibrisana od strane PTB-a. Isječak iz kalibracionog



sertifikata u kojem su dati kalibracioni koeficijenti za kvalitete N serije, prikazan je na slici 18, gdje su označeni rendgenski kvaliteti koji su korišteni za potrebe ovog rada.

$N_K = 2,646 \cdot 10^4 \text{ Gy/C}$  (ionisation chamber, see 1.4.1)  
 $k_E = 0,999$  (charge range correction UNIDOS "low dose range", see 1.4.2)  
 $k_E = 1,000$  (charge range correction UNIDOS "medium dose range", see 1.4.2)  
 $k_E = 1,000$  (charge range correction UNIDOS "high" dose range", see 1.4.2)

Q*	b in mm	s <sub>1</sub> in		a		K <sub>a</sub> in mGy/min	k <sub>Q</sub>	U in %
		mm Al	mm Cu	in cm	in cm			
N-15*	0,5 Al	0,16	0,005	100	16,7	2,57	3,755	0,8
N-20*	1,0 Al	0,36	0,01	100	16,7	2,93	1,827	0,8
N-30**	4,0 Al	1,18	0,04	150	22,5	0,19	1,126	0,8
N-40**	4,0 Al + 0,21 Cu	2,68	0,09	150	22,5	0,20	0,950	0,8
N-60**	4,0 Al + 0,6 Cu	5,91	0,24	150	22,5	0,20	0,950	0,8
N-80**	4,0 Al + 2,0 Cu	9,97	0,58	150	22,5	0,20	0,950	0,8
N-100**	4,0 Al + 5,0 Cu	13,03	1,10	150	22,5	0,20	0,951	0,8
N-120**	4,0 Al + 5,0 Cu + 1,0 Sn	15,04	1,68	150	22,5	0,20	0,951	0,8
N-150**	4,0 Al + 2,5 Sn	16,58	2,33	150	22,5	0,29	0,950	0,8
N-200**	4,0 Al + 2,0 Cu + 3,0 Sn + 1,0 Pb	19,41	3,95	150	22,5	0,29	0,950	0,8
N-250**	4,0 Al + 2,0 Sn + 3,0 Pb	21,37	5,15	150	22,5	0,29	0,964	0,8
N-300**	4,0 Al + 3,0 Sn + 5,0 Pb	22,96	6,04	150	22,5	0,30	0,967	0,8

**Slika 18.** Kalibracioni sertifikat poslan od strane PTB-a za kalibraciju jonizacione komore PTW TM 32002

Cilindrična i plan-paralelna jonizaciona komora, kalibrisane su metodom supstitucije pomoću referentnog etalona u rendgenskim kvalitetima N serije (N-40 do N-150) u veličini brzina kerme u vazduhu. Gdje je kalibracioni koeficijent izračunat na osnovu sljedećeg izraza:

$$N_{K, \dot{K}_a} = \frac{\dot{K}_a}{Q^{kor}} \quad (8.1)$$

gdje je  $\dot{K}_a$  brzina kerme u vazduhu koja je izračunata na osnovu mjerenja referentnim etalomom, pomoću izraza:

$$\dot{K}_a = N_K^{ref} \cdot Q_{kor}^{ref} \quad (8.2)$$

, a  $Q^{kor}$  mjerenja dobijena komorom na kalibraciji, korigovana za ambijentalne uslove i  $Q_{kor}^{ref}$  mjerenja dobijena referentim etalomom, korigovana za ambijentalne uslove.

Rezultati kalibracije prikazani su u tabelama 5 i 6.

**Tabela 5.** Rezultati kalibracije cilindrične jonizacione komore PTW TM 23331

Radijacioni kvalitet	Debljina dodatne filtracije (mm)	Udaljenost od fokusa cijevi (cm)	$\dot{K}_a$ (mGy/min)	Nk (μGy/pC)	U (%)
N-40	4.0 Al + 0.2 Cu	100	0.41	26.3	1.03
N-60	4.0 Al + 0.6 Cu	100	0.41	26.0	1.01
N-80	4.0 Al + 2.0 Cu	100	0.20	26.8	1.42
N-100	4.0 Al + 5.2 Cu	100	0.12	27.4	1.77
N-120	4.0 Al + 5.0 Cu + 1.0 Sn	100	0.19	27.5	1.40
N-150	4.0 Al + 2.5 Sn	100	0.53	27.8	0.94

**Tabela 6.** Rezultati kalibracije plan-paralelne jonizacione komore PTW TM 34069

Radijacioni kvalitet	Debljina dodatne filtracije (mm)	Udaljenost od fokusa cijevi (cm)	$\dot{K}_a$ (mGy/min)	Nk ( $\mu\text{Gy/pC}$ )	U (%)
N-40	4.0 Al + 0.2 Cu	100	0.41	4.00	0.92
N-60	4.0 Al + 0.6 Cu	100	0.41	4.01	0.87
N-80	4.0 Al + 2.0 Cu	100	0.20	4.13	0.88
N-100	4.0 Al + 5.2 Cu	100	0.12	4.10	0.89
N-120	4.0 Al + 5.0 Cu + 1.0 Sn	100	0.19	4.00	0.89
N-150	4.0 Al + 2.5 Sn	100	0.53	4.00	0.89

Standardna mjerna nesigurnost računa se pomoću sljedećeg izraza:

$$u^2 = \sum_x (c_x \cdot u_x)^2 \quad (8.3)$$

gdje je  $c_x$  koeficijent osjetljivosti, a bilo koja dva doprinosa  $u_i$  i  $u_j$  nisu u korelaciji. Mjerna nesigurnost U prikazana u tabelama predstavlja proširenu mjernu nesigurnost, koja je izračunata tako što je standardna mjerna nesigurnost pomnožena sa faktorom pokrivenosti  $k = 2$ .

### 8.1 Energetska zavisnost

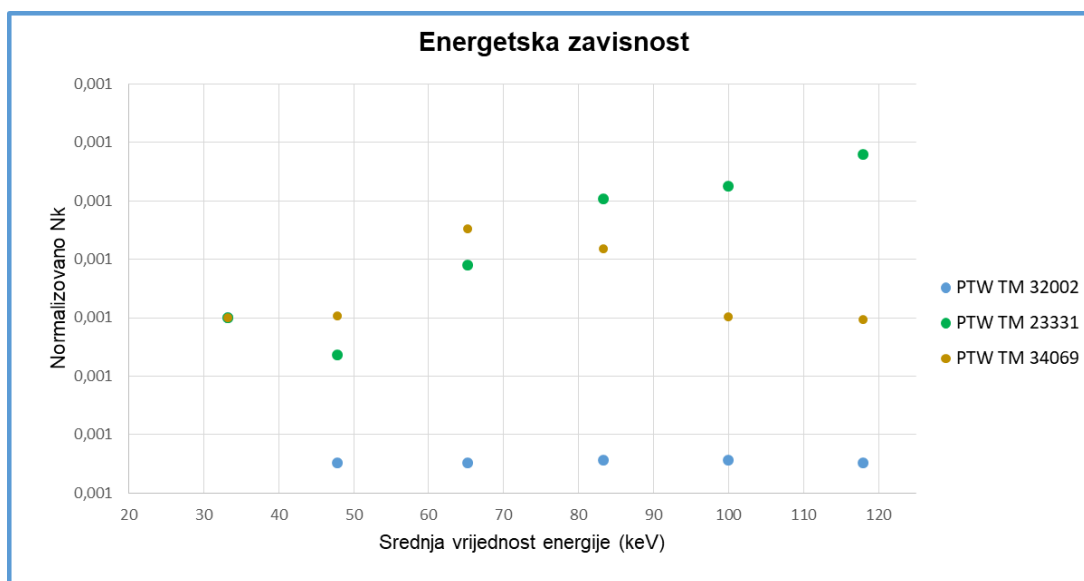
Jedan od zadataka rada bio je da se ispita energetska zavisnost navedenih jonizacionih komora, kako bi se utvrdilo da li su ispunjeni zahtjevi standarda ISO 4037-2:2019. Naime, u standardu u potpoglavlju 4.3 je navedeno da referentni etalon treba da ispuni dva zahtjeva. Prvo je da odnos maksimalne i minimalne vrijednosti odziva instrumenta ne smiju prekoračiti granične vrijednosti date u standardu  $(R_{max}/R_{min})_{lim}$ , u energetskom opsegu radijacionih kvaliteta u kojem se rade mjerenja. Drugi zahtjev je da odnos maksimalne i minimalne vrijednosti odziva instrumenta, ako je određen za dva različita kvaliteta zračenja date serije, ne prelazi vrijednost izračunatu kao:

$$1 + 0.4 \times [(R_{max}/R_{min})_{lim} - 1] \quad (8.1.1)$$

Urađena je normalizacija prethodno određenih kalibracionih koeficijenata na kalibracioni koeficijent za radijacioni kvalitet N-40 (prikazano u tabeli 7), gdje vidimo da gornja granica odnosa, pri vrijednosti srednjih energija rendgenskih kvaliteta veći od 30 keV, ne prelazi vrijednost od 1.1 što je u skladu sa zahtjevima standarda.

**Tabela 7. Normalizovane vrijednosti kalibracionih faktora**

Tip komore	Radijacioni kvalitet	Nk – PTB ( $\mu\text{Gy/nC}$ )	Srednja vrijednost energije $\bar{E}(\Phi)(\text{keV})$	Normalizovani Nk
PTW TM 32002	N-40	26.460	33.3	1.000
	N-60	25.137	47.9	0.950
	N-80	25.137	65.2	0.950
	N-100	25.163	83.3	0.951
	N-120	25.163	100	0.951
	N-150	25.137	118	0.950
Tip komore	Radijacioni kvalitet	Nk – LMRI ( $\mu\text{Gy/nC}$ )	Srednja vrijednost energije $\bar{E}(\Phi)(\text{keV})$	Normalizovani Nk
PTW TM 23331	N-40	26.33	33.3	1.000
	N-60	25.99	47.9	0.987
	N-80	26.80	65.2	1.018
	N-100	27.40	83.3	1.040
	N-120	27.52	100	1.045
	N-150	27.80	118	1.056
PTW TM 34069	N-40	4.00	33.3	1.000
	N-60	4.01	47.9	1.000
	N-80	4.13	65.2	1.030
	N-100	4.10	83.3	1.023
	N-120	4.00	100	1.000
	N-150	4.00	118	0.999



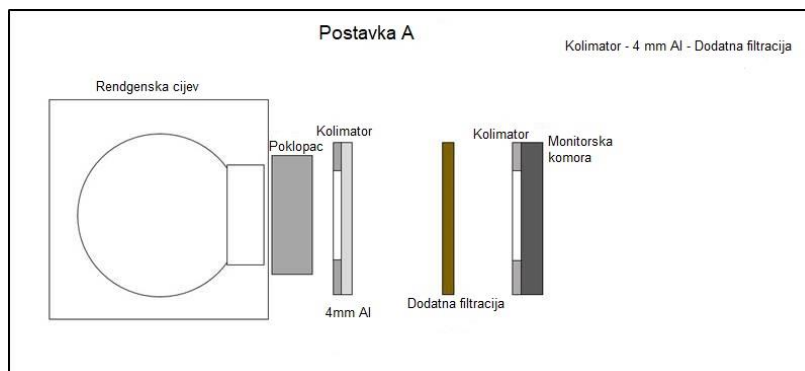
**Grafik 4. Grafički prikaz energetske zavisnosti za date jonizacione komore**

## 8.2 Fluorescentno zračenje

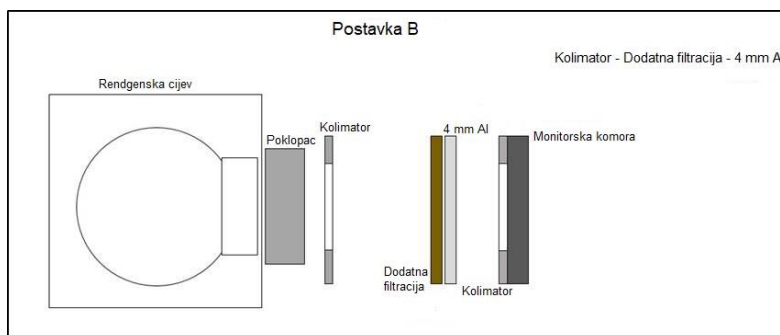
U sklopu Master rada bilo je potrebno i istražiti da li postoji uticaj fluorescentnog zračenja u odnosu na redosljed dodatne i aluminijske filtracije. Prema standardu ISO 4037-1:2019 u potpoglavlju 4.2.3.3, potrebno je aluminijske filtere debljine 4 mm, postaviti u sistemu iza dodatne filtracije za određeni kvalitet (dalje od fokusa cijevi),

kako bi se umanjio uticaj fluorescentnog zračenja. Mijenjajući redosljed filtracije, u odnosu na ono što preporučuje standard, očekivalo se da će se uočiti pomenuta razlika prilikom vršenja mjerenja. Mjerenja su prvo rađena sa cilindričnom jonizacionom komorom PTW TM 23331 i elektrometrom PTW UNIDOS 10001, na rendgenskim kvalitetima N-60, N-80 i N-120. Komora je pozicionirana u centar polja na udaljenosti od 1m od fokusa cijevi sa vremenom integracije od 60s i jačinom struje cijevi od 20 mA pri referentnim ambijentalnim uslovima.

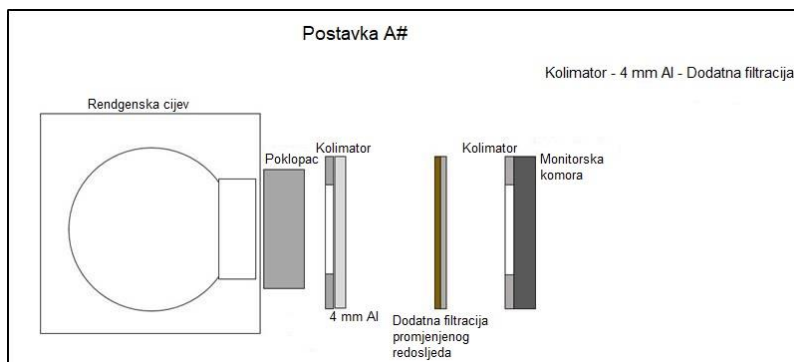
Kombinacijom različitih redosljeda filtracije, dobijene su četiri različite postavke za koje su rađena mjerenja. Postavke su prikazane na sljedećim graficima:



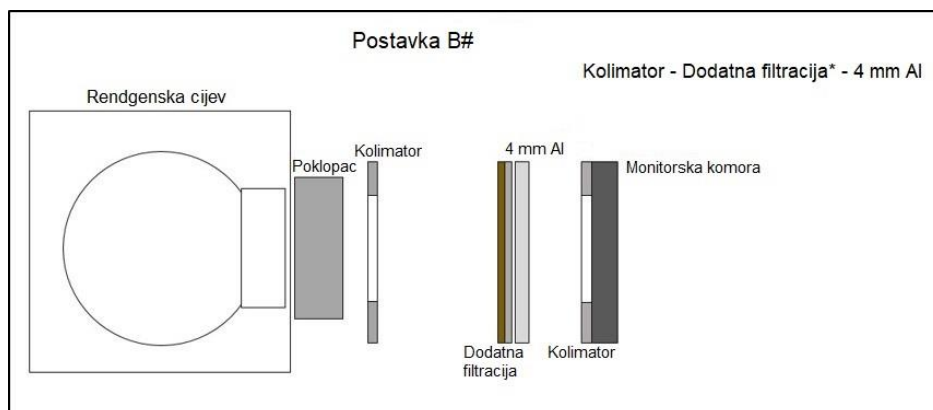
**Grafik 5. Skica postavke A**



**Grafik 6. Skica postavke B**



**Grafik 7. Skica postavke A#**



**Grafik 8.** Skica postavke B#

Kako je već ranije pomenuto ukupnu inherentnu filtraciju čine fiksna filtracija cijevi, monitorska komora i aluminijumski filteri debljine 4 mm. U postavci A koja se inače koristi u LMRI i koja je u skladu sa standardom, inherentna filtracija je postavljena iza dodatne filtracije (gledajući prema izvoru), dok je u postavci B inherentna filtracija postavljena ispred dodatne filtracije. U postavkama A# i B# koje su primijenjene samo za mjerenja na rendgenskom kvalitetu N-120, pored zamjene inherentne i dodatne filtracije kako je opisano u postavkama A i B, urađena je i zamjena rasporeda filtera u dodatnoj filtraciji za navedeni kvalitet. Naime, prema standardu ISO 4037-1:2019 u potpoglavlju 4.2.3.6, navedeno je da, kako bi se zaustavilo fluorescentno zračenje od materijala većeg atomskog broja, filteri koji čine dodatnu filtraciju biće poredani od materijala većeg ka materijalu manjeg atomskog broja. Tako da za kvalitet N-120, čiju dodatnu filtraciju čine bakar (Cu) i kalaj (Sn), bliže rendgeskoj cijevi treba postaviti kalaj pa onda iza njega bakar, tako da zamjenom mjesta u ovom slučaju očekivana je razlika u mjerenjima.

Izmjereno je naelektrisanje koje je pretvoreno u brzinu kerme u vazduhu pomoću jednačine (8.2) i izračunata je proširena mjerna nesigurnost na način kako je prethodno navedeno. Rezultati mjerenja su navedeni u tabeli 8.

**Tabela 8.** Mjerni rezultati uticaja rasporeda filtracije na fluorescentno zračenje

Postavka	Radijacioni kvalitet	Dodatna filtracija (mm)	Jačina struje (mA)	$Q_{kor}$ (pC)	$K_a$ (mGy/min)	U (%)
A	N-60	0.6 (Cu)	20	107.0	2.7812	1.04
	N-80	2.0 (Cu)		49.4	1.3241	1.42
	N-120	1.0 (Sn) + 5.0 (Cu)		28.0	0.7704	1.42
A#	N-120	1.0 (Sn) + 5.0 (Cu)	20	28.2	0.7759	1.44
B	N-60	0.6 (Cu)	20	107.0	2.7812	1.04
	N-80	2.0 (Cu)		49.3	1.3214	1.42
	N-120	1.0 (Sn) + 5.0 (Cu)		28.0	0.7704	1.42
B#	N-120	1.0 (Sn) + 5.0 (Cu)	20	27.9	0.7677	1.44

Na osnovu vrijednosti brzine kerme u vazduhu, za kvalitete zračenja N-60 i N-80, između postavke A i B nema značajnijeg odstupanja (manje od 1%), a isti je slučaj i za kvalitet zračenja N-120 za sve četiri postavke. Ovdje se ne može vidjeti uticaj fluorescentnog zračenja usljed drugačijeg redoslijeda filtera, jer je odstupanje između vrijednosti brzine kerme u vazduhu posljedica mjerne nesigurnosti, a ne nekih drugih faktora. Kasnije, mjerena su ponovljena sa spektrometrom CdTe, koja će biti prikazana u nastavku rada.

### 8.3 Određivanje HVL-a dozimetrijskom metodom

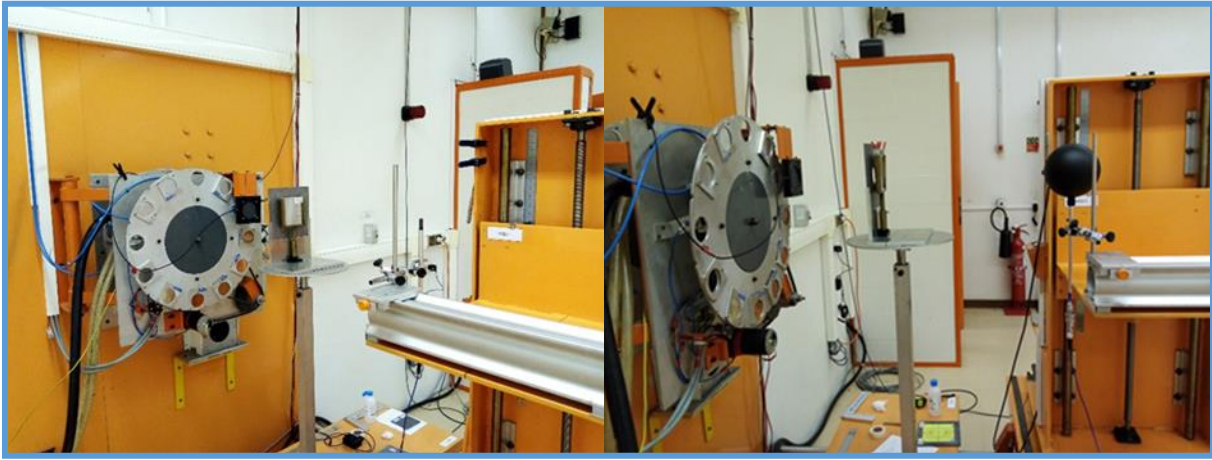
Određivanje HVL-a za rendgenske kvalitete u oblasti zaštite od zračenja, dozimetrijskom i spektrometrijskom metodom je bio jedan od važnijih zadataka ovog rada. Mjerenja su prvo rađena dozimetrijskom metodom sa jonizacionim komorama, kako bi se analizirali zahtjevi standarda navedeni u potpoglavlju 4.5.3 ISO 4037-1:2019. Gdje piše da aparatura za mjerenje HVL-a sadrži detektor i mjernu opremu. Detektor treba da bude jonizujuća komora i da ima dijametar manji od 3 cm. Kriterijumi za određivanje HVL-a opisani su u 4.5.2 standarda ISO 4037-1:2019, gde je u tabeli 14 (slika 19) dato maksimalno apsolutno odstupanje izmjenog HVL-a, od nominalne vrijednosti za aluminijumske i bakarne filtere za definisane dubine fantoma.

Table 14 — Requirements on HVL determination for matched reference fields

Radiation quality  Short name	Maximum absolute deviation of measured HVL, $ \Delta D_{HVL, abs} $ , from nominal value for aluminium and definition phantom depth $d$ of			Maximum absolute deviation of measured HVL, $ \Delta D_{HVL, abs} $ , from nominal value for copper and definition phantom depth $d$ of		
	0,07 mm $\mu\text{m}$	3 mm $\mu\text{m}$	10 mm $\mu\text{m}$	0,07 mm $\mu\text{m}$	3 mm $\mu\text{m}$	10 mm $\mu\text{m}$
N-10	50	0,5 <sup>b</sup>	5 <sup>a</sup>			
N-15	50	2 <sup>b</sup>	5 <sup>b</sup>			
N-20	100	10	10			
N-25	300	30	30			
N-30	500	50	100			
N-40	500	200				
N-60				100	20	20
N-80				200	200	100
N-100 to N400				200	200	200

Slika 19. Prikaz tabele 14 is ISO 4037-1 2019

Mjerenja su vršena sa cilindričnom komorom PTW TM 23331 (dijametra 8 mm) i referentim etalom LMRI, PTW TM 32002 (dijametra 14 cm). Komore su postavljene na udaljenosti od 1 m od fokusa cijevi, kako bi bile u homogenom dijelu polja. Naelektrisanje je mjereno tokom 60 s, pri struji od 10 mA za cilindričnu komoru i 2 mA do 5 mA za referentni etalon. Metalni apsorberi različitih debljina i kolimatori, postavljani su u polje na jednakoj udaljenosti od fokusa cijevi i od komore (slika 20). Čistoća metalnih apsorbera koji su korišćeni bila je za bakarne filtere 99,9 % i za aluminijumske 99,999 %.



**Slika 20.** Eksperimentalna postavka u LMRI za određivanje HVL-a dozimetrijskom metodom

Prečnik snopa na mjestu detektora i ugao snopa nakon kolimatora određeni su sljedećim jednačinama:

$$D_b = \tan \left[ \frac{(\alpha_b \cdot \pi)}{180^\circ} \right] \cdot L_d \cdot 2 \quad (8.3.1)$$

$$\alpha_b = \arctan \left[ \frac{D_c}{L_c} \right] \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (8.3.2)$$

gde je  $L_d$  rastojanje detektora od fokusa cijevi,  $D_c$  je prečnik kolimatora, a  $L_c$  je rastojanje kolimatora i metalnih apsorbera od fokusa cijevi.

Prečnik kolimatora koji su korišćeni bio je 50 mm za mjerenja sa cilindričnom komorom i 80 mm za mjerenja sa referentnim etalonom. Na osnovu ovih jednačina i poznatih podataka, prečnik snopa je bio 10 cm, ugao snopa 2.9° i 16 cm i 4.6° respektivno.

Izmjereno naelektrisanje je pretvoreno u kermu u vazduhu, gdje je HVL izračunat platujući krivu atenuacije:

$$f(D) = \log_e(\dot{K}_{a,D}) \quad (8.3.3)$$

gdje je  $\dot{K}_{a,D}$  vrijednost kerme u vazduhu koja prođe kroz metalni apsorber debljine D i dođe do detektora. Rezultati mjerenja prikazani su u sljedećim tabelama.[9]

**Tabela 9.** Vrijednosti HVL-a određene na osnovu mjerenja sa cilindričnom komorom PTW TM 23331

Radijacioni kvalitet	Preporučena inherentna filtracija (mm)	Vrijednost prvog HVL-a na udaljenosti od 1m od fokusa cijevi (mm)				Vrijednost drugog HVL-a na udaljenosti od 1m od fokusa cijevi (mm)			
		ISO	LMRI	Rel devi. (%)	Abs.dev. (µm)	ISO	LMRI	Rel. Dev.(%)	Abs.dev.(µm)
N-40	4 (Al)	2.63 (Al)	2.71	3.18	<b>83.73</b>	2.83 (Al)	2.78	-1.89	<b>-53.44</b>
N-60	4 (Al)	0.234 (Cu)	0.230	-1.77	<b>-4.15</b>	0.263 (Cu)	0.256	-2.75	<b>-7.23</b>
N-80	4 (Al)	0.578 (Cu)	0.579	0.09	<b>0.54</b>	0.622 (Cu)	0.645	3.64	<b>22.64</b>
N-100	4 (Al)	1.09 (Cu)	1.07	-1.97	<b>-21.51</b>	1.15 (Cu)	1.16	0.52	<b>5.96</b>
N-120	4 (Al)	1.67 (Cu)	1.72	3.21	<b>53.62</b>	1.73 (Cu)	1.80	3.95	<b>68.31</b>
N-150	4 (Al)	2.30 (Cu)	2.44	5.89	<b>135.42</b>	2.41 (Cu)	2.53	4.83	<b>116.50</b>

**Tabela 10. Vrijednosti HVL-a određene na osnovu mjerenja sa referentnim etalom PTW TM 32002**

Radijacioni kvalitet	Preporučena inherentna filtracija (mm)	Vrijednost prvog HVL-a na udaljenosti od 1m od fokusa cijevi (mm)				Vrijednost drugog HVL-a na udaljenosti od 1m od fokusa cijevi (mm)			
		ISO	LMRI	Rel devi. (%)	Abs.dev. (µm)	ISO	LMRI	Rel. Dev.(%)	Abs.dev.(µm)
N-40	4 (Al)	2.63 (Al)	2.78	5.62	<b>147.90</b>	2.83 (Al)	2.79	-1.25	<b>-35.50</b>
N-60	4 (Al)	0.234 (Cu)	0.229	-2.31	<b>-5.40</b>	0.263 (Cu)	0.252	-4.21	<b>-11.08</b>
N-80	4 (Al)	0.578 (Cu)	0.589	1.90	<b>11.01</b>	0.622 (Cu)	0.657	5.66	<b>35.19</b>
N-100	4 (Al)	1.09 (Cu)	1.13	3.72	<b>40.52</b>	1.15 (Cu)	1.15	-0.04	<b>-0.46</b>
N-120	4 (Al)	1.67 (Cu)	1.80	7.72	<b>128.95</b>	1.73 (Cu)	1.82	5.25	<b>90.86</b>
N-150	4 (Al)	2.30 (Cu)	2.45	6.55	<b>150.59</b>	2.41 (Cu)	2.56	6.10	<b>147.06</b>

HVL vrijednosti dobijene na osnovu mjerenja sa cilindričnom jonizacionom komorom su unutar opsega navedenog u ISO 4037-1:2019 (slika 19).

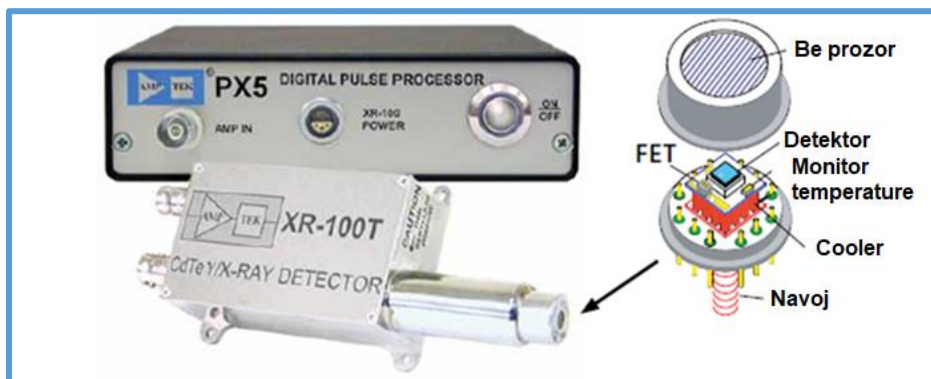
Vrijednosti HVL-a dobijene sa sekundarnim etalom prikazane u tabeli 10, za kvalitete od N-60 do N-150 su u opsegu navedenom u ISO 4037-1:2019. Samo prvi HVL za kvalitet zračenja N-40 za dubinu fantoma od 10 mm je izvan opsega navedenog u standardu.

Upoređujući vrijednosti prvog HVL-a dobijene sa ovim komorama, zaključeno je da su vrijednosti dobijene sa referentnim etalom bliže gornjoj granici opsega navedenog u ISO 4037-1:2019, što se i očekivalo. Relativna devijacija prvog HVL-a izračunatog na osnovu mjerenja dobijenog sa komorama, iznosila je do 5.9 %.



## 9. Spektrometrijska metoda

Spektar visine impulsa (*engl. pulse height spectra*) za ISO radijacione kvalitete N serije (od N-40 do N-150), je izmjeren pomoću komercijalno dostupnog CdTe spektrometra AMPTEK XR 100T (slika 21). Koji je detektor x i gama zračenja visokih performansi, pretpojačalo i cooler, koji koristi  $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$  kadmijum telurid (CdTe) diodni detektor montiran na dvostepeni termoelektrični hladnjak. Hladnjak održava detektor i ključne komponente na  $-25 \text{ C}^\circ$  ili niže. Iz tog razloga spektrometar se može koristiti na sobnoj temperaturi. Debljina berilijumskog prozora je  $100 \text{ }\mu\text{m}$ .



**Slika 21.** Prikaz CdTe x i gama detektora sa PX5 digitalnim pulsničkim procesorom

X ili gama zračenje u interakciji sa atomima kadmijuma i telurijuma stvara u prosjeku jedan par elektron/šupljina za svakih  $4.43 \text{ eV}$  energije deponovane u CdTe kristalu. U zavisnosti od energije upadnog zračenja, deponovanje energije je posljedica ili fotoelektričnog efekata ili Komptonovog rasijanja. Vjerovatnoća ili efikasnost detektora da „zaustavi“ upadno zračenje i stvori parove elektron/šupljina raste sa debljinom CdTe. Efikasnost detekcije tankog poluprovodničkog CdTe detektora, kako tvrdi proizvođač, je 100% u energetsom opsegu  $10 - 60 \text{ keV}$ .

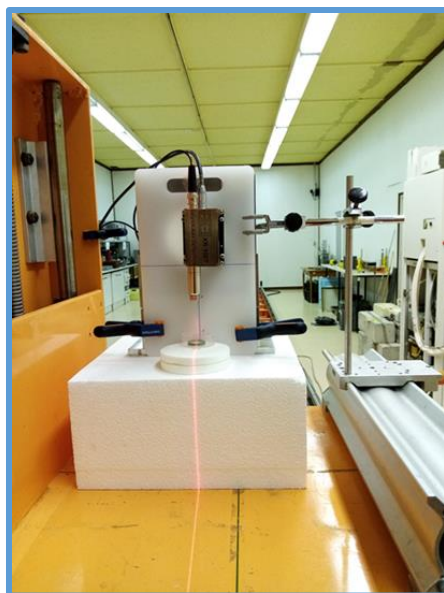
Rezolucija CdTe spektrometra na  $122 \text{ keV}$  je manja od  $1.2 \text{ keV FWHM}$  (*engl. Full width at half maximum*). Optimalni opseg energije je od  $5 \text{ keV}$  do  $150 \text{ keV}$ , a maksimalna stopa brojanja (*engl. count rate*) je do  $2 \times 10^5 \text{ cps}$ . Napajanje XR-100T-CdTe spektrometru obezbjeđuje se pomoću PX5 digitalnog pulsničkog procesora, koji je takođe višekanalni analizator (*MCA engl. multi-channel analyzer*). Sve što je potrebno je  $+5 \text{ V DC}$  ulaz i USB, Ethernet kabel ili RS232 veza sa računarom. Sistem se može kontrolisati pomoću Amptek DppMCA softvera za prikaz i akviziciju. Ovaj softver u potpunosti kontroliše i konfigurira sistem, preuzima i prikazuje podatke. Obezbuđuje regione od interesa (*engl. ROI-region of interest*), kalibracije, analizu pikova i tako dalje. Softver za akviziciju konfigurira hardver, pokreće i zaustavlja prikupljanje podataka i čita spektre visine impulsa sa spektrometra.

Na osnovu preporuka proizvođača, bilo je potrebno izvršiti određena podešavanja spektrometra prije mjerenja spektra visine impulsa x zračenja. Primijenjen je napon od  $700 \text{ V}$ , kako bi se olakšao proces kolektovanja parova elektron/šupljina u CdTe

detektoru i temperatura detektora je podešena na 220 K. Korišten je odgovarajući „Gain“, Gain = 1, Gain = 5 i Gain = 10. Promjena Gain-a mijenja opseg energije pune skale. Na primjer, Gain od 100 može odgovarati energetsom opsegu pune skale od 15 keV, dok će Gain od 50 imati punu skalu od 30 keV. Ovo se može uraditi na „Gain & Pole Zero“ tabu u prozoru za podešavanje DPP-a ili korišćenjem opcija za Gain na traci sa alatima. Neophodno je ponovo podesiti pragove (*engl. thresholds*) kad god se Gain promijeni. Povećavajući gain, spektar se pomijera udesno. Veći DPP gain dovodi do niže energije cijele skale. Broj kanala (*engl. channel*) je bio 8192. Realno vrijeme je vrijeme koje je proteklo između pokretanja i zaustavljanja akvizicije podataka i postavljeno je na 5 min. Uključen PUR (*engl. Pile-up rejecter*), kako bi se izbjegla posljedica da dva ili više fotona budu detektovani skoro istovremeno i da se ne prepoznaju kao odvojeni događaji.

Na kraju podešavao se „Autotune“ koji prvobitno postavlja pragove na nulu, što uzrokuje veoma visoku stopu brojanja na brzim i sporim kanalima. Visina impulsa mora biti veća od praga, tada puls mora pasti ispod svog maksimuma za prag prije nego što sistem prepozna da se desio pik.[6]

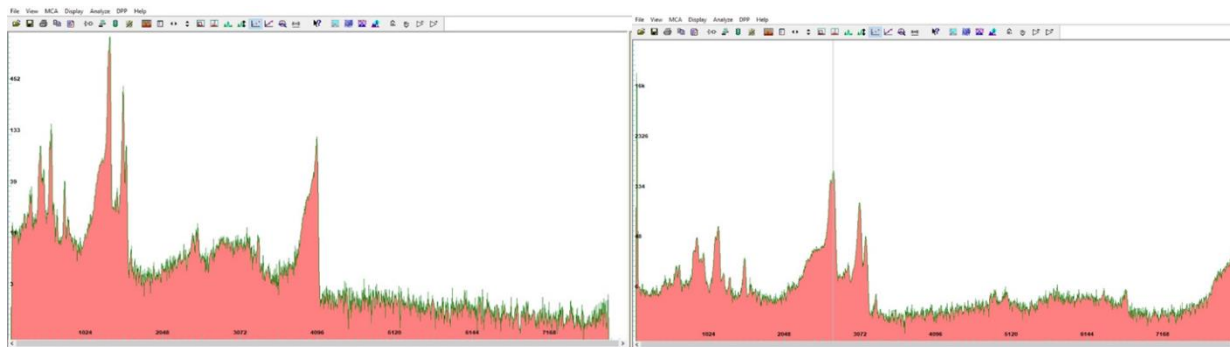
Nakon podešavanja eksperimentalne postavke pristupilo se mjerenjima. Prvo su izmjereni spektri poznatih izvora, kako bi se izvršila energetska kalibracija. Korišteni izvori su Am-241 (59.9 keV), Cs-137 (32.2 keV), Ba-133 (80.9 keV) i Eu-152 (121.8 keV).[2] Spektrometar „ne zna“ energiju povezanu sa svakom visinom impulsa; ovo može zavistiti od mnogih parametara instrumenta. Energetska kalibracija uspostavlja vezu između broja kanala i energije. Nakon mjerenja spektra poznatih izvora, sljedeći korak je bio da se uradi linearni fit između poznate energije i broja kanala. Dakle, trebalo bi da budu najmanje dva pika znatno iznad background-a, odvojena od pikova koji se preklapaju i daleko jedan od drugog u energiji. Postavka spektrometra pri mjerenju spektara poznatih izvora prikazana je na slici 22.



**Slika 22.** Postavka CdTe spektrometra u LMRI pri mjerenju spektra poznatih izvora

Korištenjem linearnog fitovanja između poznatih energija i broja kanala, izračunata je energija po kanalu za Gain=5 i Gain=10, što je korišteno kasnije, na spektrima N serije.





**Slika 26.** Spektri izvora Eu-152 pri Gain=5 (lijevo) i Gain=10 (desno)

U tabelama 11 i 12 prikazane su energije poznatih izvora i njima odgovarajući broj kanala:

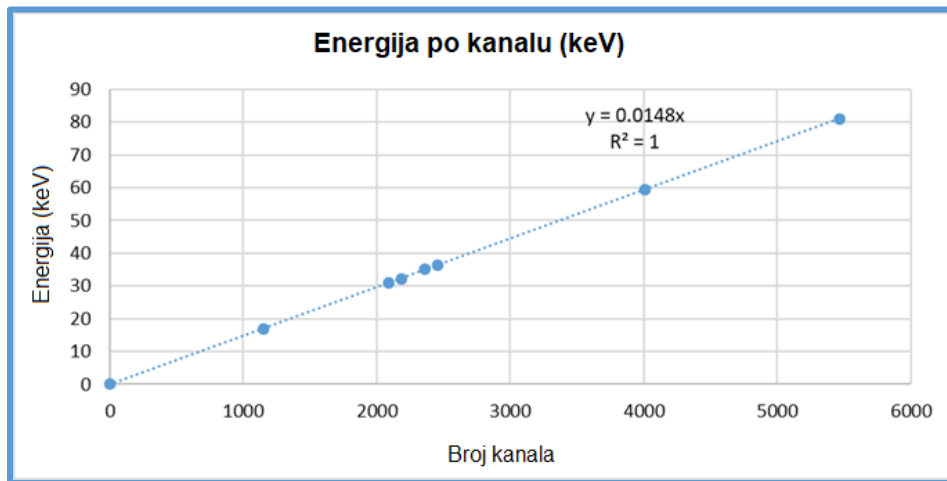
**Tabela 11.** Energetska kalibracija za Gain=10

Poznati izvor	Energija (keV)	Gain	Broj kanala	Energija po kanalu (keV)
Cs-137	36.4457	10	2458	0.01484344
	32.1939		2184	
Am-241	59.5409	10	4007	
	16.96		1151	
Ba-133	80.9979	10	5464	
	35.053		2364	
	30.9731		2088	

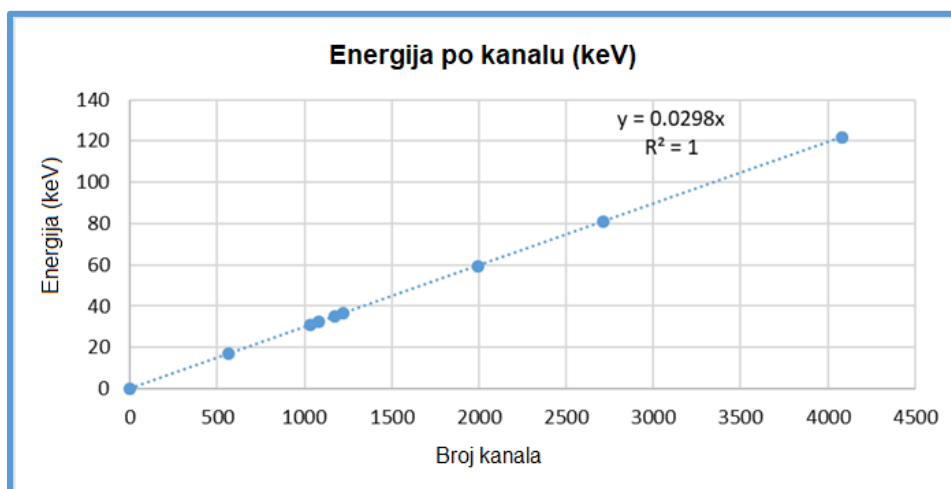
**Tabela 12.** Energetska kalibracija za Gain=5

Poznati izvor	Energija (keV)	Gain	Broj kanala	Energija po kanalu (keV)
Cs-137	36.4457	5	1211	0.029852299
	32.1939		1084	
Am-241	59.5409	5	1996	
	16.96		565	
Ba-133	80.9979	5	2711	
	35.053		1175	
	30.9731		1034	
Eu-152	121.7817	5	4080	

Na sljedećim graficima prikazan je linearni fit na osnovu poznatih energija i odgovarajućeg kanala.



**Grafik 9.** Linearni fit između energija poznatih izvora i broja kanala za Gain=10



**Grafik 10.** Linearni fit između energija poznatih izvora i broja kanala za Gain=5

U potpoglavlju 8.2 opisano je mjerenje uticaja fluorescentnog zračenja jonizacionom komorom, gdje rezultati mjerenja brzine kerme u vazduhu nisu pokazivali značajna odstupanja između različitih postavki. Kako je i navedeno mjerenja su ponovljena sa CdTe spektrometrom. Mjerenja su ponovljena za iste kvalitete zračenja iz N serije (N-60, N-80 i N-120) sa vremenom integracije od 60s i strujom od 0.01 mA. Jačina struje je smanjena u ovom slučaju kako bi se izbjeglo nagomilavanje fotona x zračenja i veliko mrtvo vrijeme. Spektrometar je postavljen na 1 m od fokusa cijevi. Korištene su iste postavke inherentne i dodatne filtracije i mjerenja su rađena pri referentnim ambijentalnim uslovima. U ovom slučaju smo tražili karakteristično  $K_{\alpha}$  zračenje, kao posljedica fotoelektričnog efekta ili Komptonovog rasijanja.[7]

Energije karakterističnih  $K_{\alpha}$  x zraka materijala su:

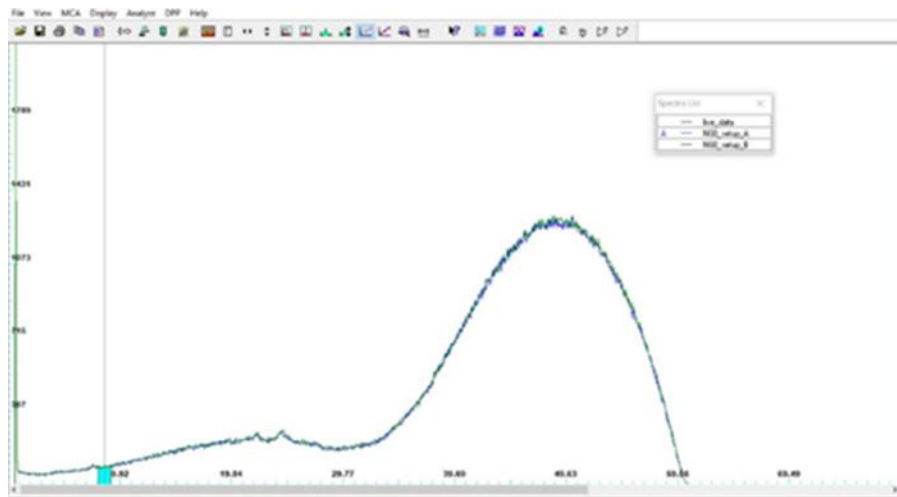
- Za bakar  $K_{\alpha 1}= 8.05$  keV i  $K_{\alpha 2}= 8.9$  keV
- Za aluminijum  $K_{\alpha 1}= 1.49$  keV i  $K_{\alpha 2}= 1.55$  keV
- Za kalaj  $K_{\alpha 1}=25.27$  keV i  $K_{\alpha 2}= 28.48$  keV

Ovi metali su odabrani, zato što čine dodatnu i inherentnu filtraciju pomenutih kvaliteta za koja su rađena mjerenja.

Ovdje su takođe primijenjena podešavanja za DppMCA softver, koja su prethodno navedena. U ovom eksperimentu se očekivalo da se u spektru vide pikovi karakterističnog  $K\alpha$  zračenja. Za kvalitete N-60 i N-80 na osnovu izmjerenog spektra za sve četiri postavke i na osnovu odstupanja vrijednosti bruto površina (*engl. gross areas*) očitanih sa spektra u opsegu navedenih energija, zaključeno je da nema značajne razlike pa samim tim nema karakterističnog  $K\alpha$  zračenja aluminijuma i bakra. (tabele 13 i 14).

**Tabela 13.** Poređenje bruto površina spektra za radijacioni kvalitet N-60 za postavke A i B u oblasti energija od 8 keV do 9 keV

Postavka	Radijacioni kvalitet	Dodatna filtracija (mm)	Inherentna filtracija (mm)	Bruto površina	Odstupanje (%)
B	N-60	0.6 (Cu)	4.0 (Al)	5723	0.42
A	N-60	0.6 (Cu)	4.0 (Al)	5699	

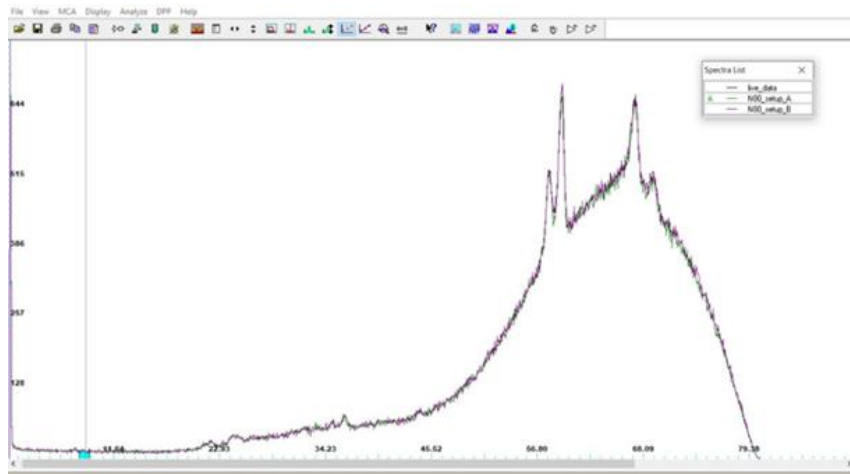


**Grafik 11.** Spektri snimljeni softverom za kvalitet N-60 za postavke A i B

**Tabela 14.** Poređenje bruto površina spektra za radijacioni kvalitet N-80 za postavke A i B u oblasti energija od 8 keV do 9 keV

Postavka	Radijacioni kvalitet	Dodatna filtracija (mm)	Inherentna filtracija (mm)	Bruto površina	Odstupanje (%)
B	N-80	2.0 (Cu)	4.0 (Al)	928	4.47
A	N-80	2.0 (Cu)	4.0 (Al)	972	





**Grafik 12.** Spektri snimljeni softverom za kvalitet N-80 za postavke A i B

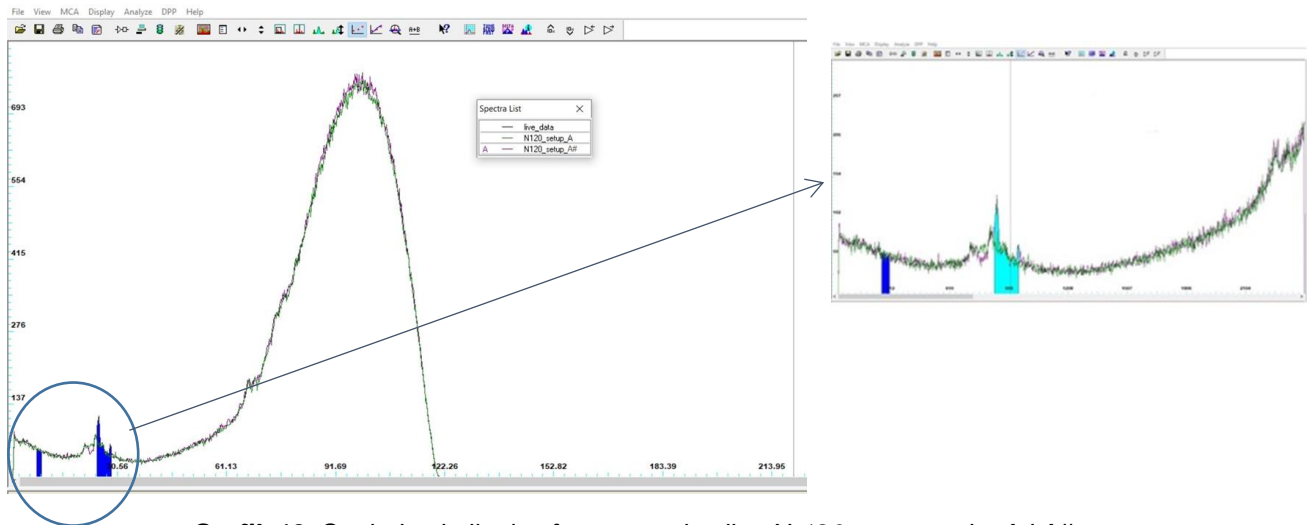
Za kvalitet N-120 razlika je uočena samo između postavki A i A#. Kao što je gore pomenuto u postavci A#, inherentna filtracija je iza dodatne filtracije (okrenuta prema izvoru x zračenja), dok dodatna filtracija nema ispravan redoslijed prema ISO 4037-1:2019. Stoga je odstupanje vrijednosti bruto površina za izmjereni spektar u energetsom opsegu od 25 keV do 28,5 keV znatno veći (tabele 15 i 16). Također na spektru prikazanom na grafiku 13 je vidljiv pik koji se dobije pri mjerenjima na postavci A# u oblasti energija od 25 keV do 28.5 keV. Na osnovu svih podataka je zaključeno da se u ovom slučaju radi o karakterističnom K $\alpha$  zračenju koje potiče od kalaja.

**Tabela 15.** Poređenje bruto površina spektra za radijacioni kvalitet N-120 za postavke A i A# u oblasti energija od 8 keV do 9 keV

Postavka	Radijacioni kvalitet	Dodatna filtracija (mm)	Inherentna filtracija (mm)	Bruto površina	Odstupanje (%)
A	N-120	5.0 (Cu) + 1.0 (Sn)	4.0 (Al)	1704	-0.76
A#	N-120	5.0 (Cu) + 1.0 (Sn)	4.0 (Al)	1694	

**Tabela 16.** Poređenje bruto površina spektra za radijacioni kvalitet N-120 za postavke A i A# u oblasti energija od 25 keV do 28.5 keV

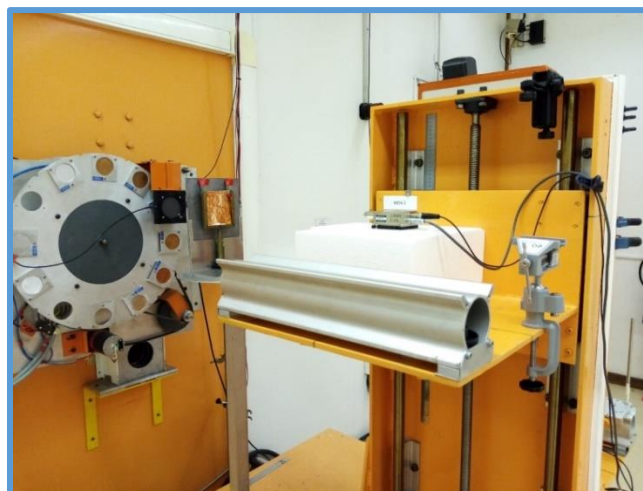
Postavka	Radijacioni kvalitet	Dodatna filtracija (mm)	Inherentna filtracija (mm)	Bruto površina	Odstupanje (%)
A	N-120	5.0 (Cu) + 1.0 (Sn)	4.0 (Al)	6151	16.76
A#	N-120	5.0 (Cu) + 1.0 (Sn)	4.0 (Al)	7182	



**Grafik 13.** Spektri snimljeni softverom za kvalitet N-120 za postavke A i A#

## 9.1 Određivanje HVL-a spektrometrijskom metodom

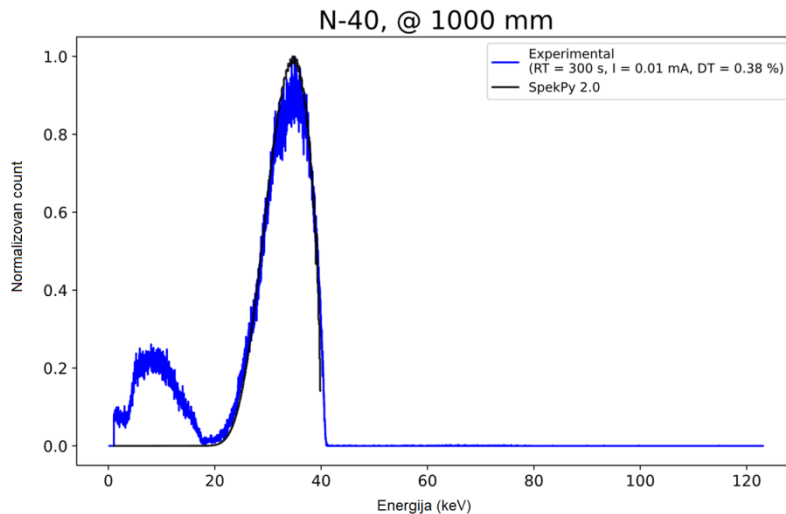
Kako je i navedeno u potpoglavlju 8.3 vrijednosti prvog i drugog HVL-a određivale su se dozimetrijskom i spektrometrijskom metodom, gdje je u navedenom potpoglavlju opisana eksperimentalna postavka i navedeni su rezultati mjerenja za dozimetrijsku metodu. Pri određivanju HVL-a spektrometrijskom metodom, mjereni su spektri visine impulsa N serije (N-40 do N-150) sa CdTe spektrometrom. Za HVL je korištena ista debljina filtera koja je korištena pri mjerenjima sa cilindričnom komorom PTW TM 23331. Spektrometar je postavljen na rastojanju od 1 m od fokusa cijevi. Držać za metalne apsorbere i kolimator prečnika 50 mm postavljeni su na udaljenosti od 50 cm od fokusa cijevi (slika 27). Za kvalitete od N-40 do N-120 korištena je struja jačine 0.01 mA, a za kvalitet N-150 struja od 0.05 mA. Urađeno je i podešavanje DppMCA softvera kako je prethodno opisano, sa realnim vremenom od 5 min. Mjerenja su rađena pri referentnim ambijentalnim uslovima.



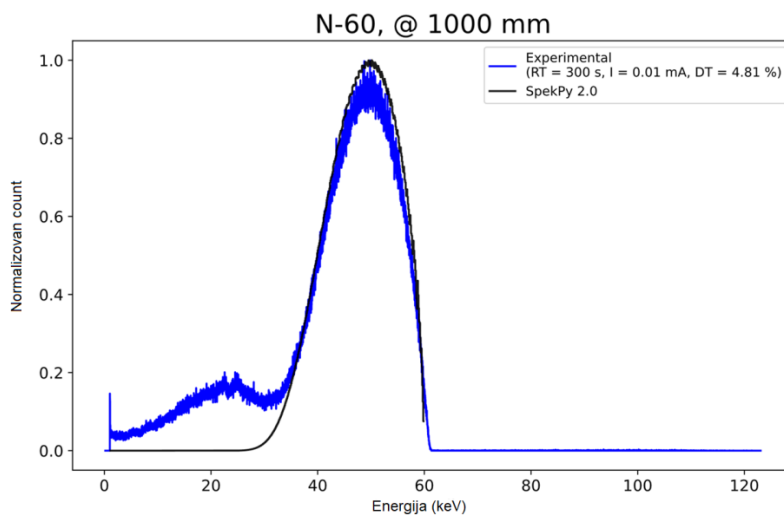
**Slika 27.** Prikaz eksperimentalne postavke u LMRI pri mjerenjima spektra visine impulsa N serije



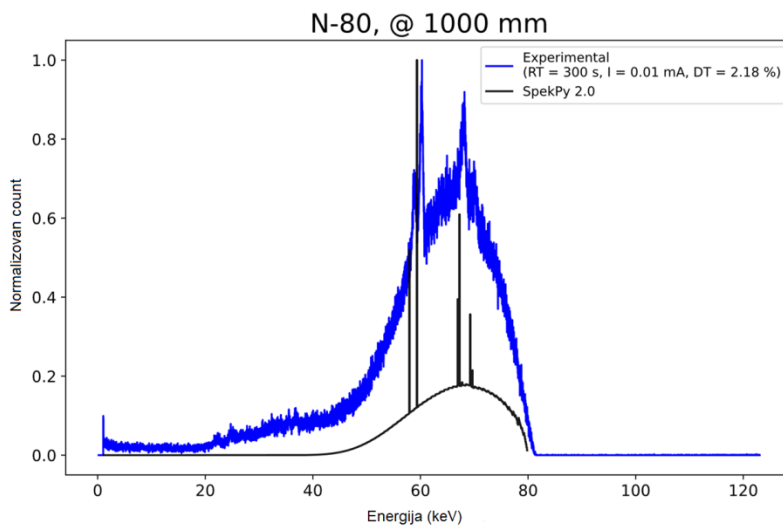
Takođe, izmjereni spektri visine impulsa su upoređeni sa spektrima dobijenim pomoću SpekPy v2.0, besplatnog programa za modelovanje spektra rendgenskih kvaliteta pomoću programskog jezika Python, [12] što se može vidjeti na sljedećim graficima.



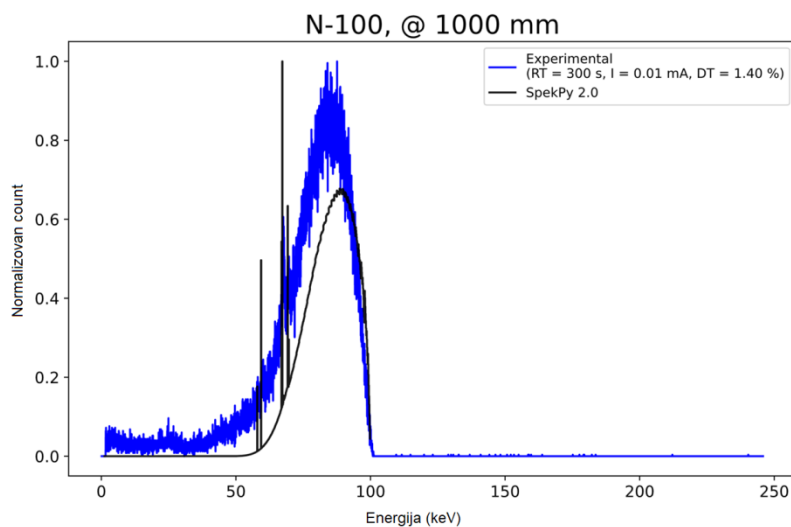
**Grafik 14.** Spektar za kvalitet N-40 dobijen eksperimentalno i sa SpekPy v2.0



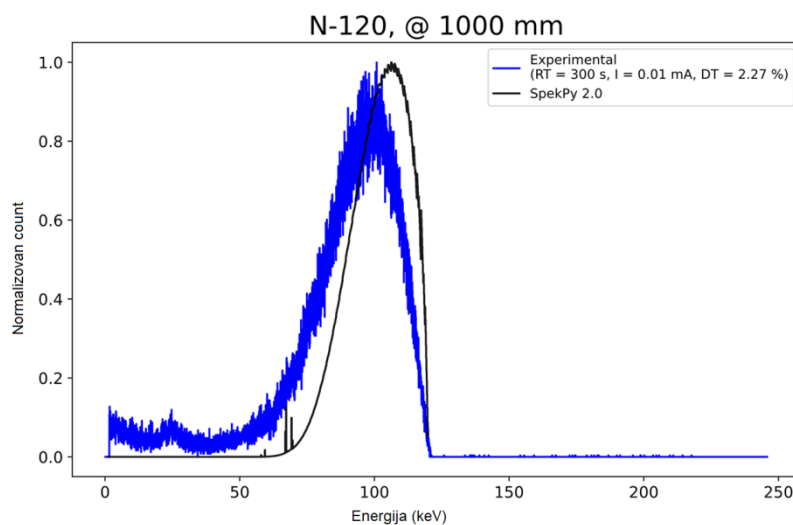
**Grafik 15.** Spektar za kvalitet N-60 dobijen eksperimentalno i sa SpekPy v2.0



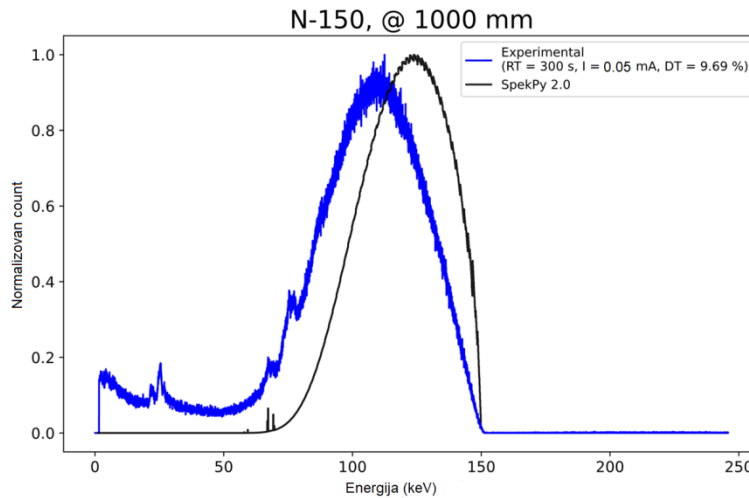
**Grafik 16.** Spektar za kvalitet N-80 dobijen eksperimentalno i sa SpekPy v2.0



**Grafik 17.** Spektar za kvalitet N-100 dobijen eksperimentalno i sa SpekPy v2.0



**Grafik 18.** Spektar za kvalitet N-120 dobijen eksperimentalno i sa SpekPy v2.0



**Grafik 19.** Spektar za kvalitet N-150 dobijen eksperimentalno i sa SpekPy v2.0

Iz grafika poređenja izmjenenog spektara visine impulsa i spektra dobijenog pomoću SpekPy, zaključeno je da su maksimalne energije za svaki kvalitet jednake teorijskoj vrijednosti maksimalnih energija. Kod kvaliteta od N-80 do N-150 primijećena su neka karakteristična  $K\alpha$  zračenja volframa. Za kvalitete N-100, N-120 i N-150, spektar visine impulsa je nagnut, u poređenju sa simuliranim spektrom, ka nižim energijama fotona. Zaključeno je da to može biti posljedica nepotpunog prikupljanja naelektrisanja (hole trapping), [7] također su karakteristični pikovi volframa bili pomjereni na energetske osi, tj. pik nije odgovarao energiji koja bi u teorijskom smislu trebala biti. Uočena je i razlika u niskoenergetskom dijelu spektra, upoređujući spektar visine impulsa i simulirani spektar. U spektru visine impulsa za kvalitet N-150 u oblasti energetskog opsega od 25 keV do 28.5 keV nalazi se karakteristično  $K\alpha$  zračenje kalaja. Za kvalitete N-100 i N-120, dodatna filtracija sadrži bakar za N-100 i bakar i kalaj za N-120, međutim u spektru visine impulsa nema karakterističnih  $K\alpha$  zračenja bakra ili kalaja, što je i zaključeno na osnovu prethodnih mjerenja.

Pomenuta razlika u niskoenergetskom dijelu spektra, može biti posljedica karakterističnih  $K\alpha$  zračenja kadmijuma i telurijuma. Takođe u spektrima visine impulsa kvaliteta N-40, N-60 i N-80, niskoenergetski dio sadrži neke odmetnute karakteristične  $K\alpha$  zrake kadmijuma i telurijuma. Što ima za posledicu da se detektovana energija smanjuje u poređenju sa energijom deponovanom u kristalu, interakcijom primarnog fotona. Dakle, detektovana energija je jednaka energiji pobjeglog karakterističnog fotona.[8]

Svi pomenuti negativni uticaji na izmjereni spektar: visok fluks fotona, distorzija spektra, efekat pobjeglog karakterističnog fotona, nepotpuno kolektovanje naelektrisanja, efikasnost detektora i slučajne koincidencije mogu se djelimično eliminisati korištenjem matrice odziva (*engl. response matrix*). Matrica odziva se može konstruisati algebarski ili korištenjem stohastičkog pristupa (Monte Karlo metode), a konstruiše se za određeni detektor i sadrži vjerovatnoće pojedinačnih procesa koji se dešavaju u detektoru.

Spektri visine impulsa se mogu korigovati uz pomoć ove matrice kako bi se kreirali spektri fluensa.[7]

$$\Phi_E = R^{-1} \cdot M_E \quad (9.1.1)$$

gdje je  $\Phi_E$  spektar fluensa,  $M_E$  spektar visine impulsa, a  $R^{-1}$  je matrica odziva.

Nismo bili uspješni u kreiranju matrice odziva. Dakle, nismo bili u mogućnosti da uradimo korekciju eksperimentalno izmjerenih spektara, da bismo došli do spektra fluensa. Tako da su svi dalji proračuni napravljeni na osnovu spektra visine impulsa.

Pri procjeni srednje energije spektra visine impulsa, primijenjena je minimalna i maksimala granična energija od 5 keV i od 1 keV (*engl. cut-off energy*) iznad teorijske maksimalne energije respektivno, jer ovi dijelovi spektra visine impulsa nemaju fizički značaj, ali daju značajan doprinos procjeni srednje energije. A kasnije i procjeni prvog i drugog HVL-a.[9]

Srednja energija spektra visine impulsa, za kvalitet zračenja R procijenjena je korištenjem sljedeće jednačine:

$$E_R = \frac{\sum_{i=1}^{i=8192} C_i \cdot E_i}{\sum_{i=1}^{i=8192} C_i} \quad (9.1.2)$$

gdje je  $E_R$  energija po kanalu, a  $C_i$  je broj count-a po kanalu.

U tabeli 17 prikazane su vrijednosti srednje energije spektra visine impulsa i relativnog odstupanja od srednje energije date standardom ISO 4037-1:2019 za spektre N serije.

**Tabela 17.** Relativna devijacija srednjih energija spektra visine impulsa u odnosu na vrijednosti u ISO 4037-1 2019

Radijacioni kvalitet	Srednja energija ISO 4037-1 2019 (keV)	Srednja energija spektra visine impulsa (keV)	Relativna devijacija (%)
N-40	33.3	29.0	-12.91
N-60	47.9	42.9	-10.44
N-80	65.2	60.0	-8.01
N-100	83.3	75.0	-9.98
N-120	100	89	-11.36
N-150	118	100	-15.16

HVL spektra visine impulsa, procijenjen je plotujući krivu atenuacije:

$$f(D) = \log_e \left[ \sum_{i=1}^{i=8192} (E_i \cdot C_i)_D \right] \quad (9.1.3)$$

gdje je  $E_i$  energija po kanalu,  $C_i$  broj count-a po kanalu, a D je debljina metalnih apsorbera. U tabeli 18 prikazane su procijenjene vrijednosti prvog i drugog HVL-a, spektrometrijskom metodom.

**Tabela 18.** Procijenjene vrijednosti prvog i drugog HVL-a N serije kvaliteta spektrometrijskom metodom

Radijacioni kvalitet	Vrijednost prvog HVL-a na udaljenosti od 1m od fokusa cijevi (mm)				Vrijednost drugog HVL-a na udaljenosti od 1m od fokusa cijevi (mm)			
	ISO 4037-1 2019	LMRI	Rel. dev. (%)	Ab. dev. ( $\mu\text{m}$ )	ISO 4037-1 2019	LMRI	Rel. dev. (%)	Ab. dev. ( $\mu\text{m}$ )
N-40	2.63 (Al)	2.72	3.42	90	2.83 (Al)	2.79	-1.41	-40
N-60	0.234 (Cu)	0.249	6.41	15	0.263 (Cu)	0.269	2.28	6
N-80	0.578 (Cu)	0.611	5.71	33	0.622 (Cu)	0.666	7.07	44
N-100	1.09 (Cu)	1.08	-0.92	-10	1.15 (Cu)	1.10	-4.35	-50
N-120	1.67 (Cu)	1.44	-13.77	-230	1.73 (Cu)	1.57	-9.25	-160
N-150	2.30 (Cu)	2.49	8.26	190	2.41 (Cu)	2.39	-0.83	-20

Rezultati u tabeli 18 pokazuju da je za kvalitet N-120 vrijednost prvog HVL-a izvan opsega navedenog u tabeli 14 standarda ISO 4037-1:2019, dok su vrijednosti prvog i drugog HVL-a ostalih kvaliteta unutar opsega.

Poređenje vrijednosti prvog HVL-a dobijenih dozimetrijskom i spektrometrijskom metodom prikazani su u tabeli 19.

**Tabela 19.** Poređenje vrijednosti prvog HVL-a dobijenih spektrometrisjkom i dozimetrijskom metodom

Radijacioni kvalitet	Vrijednost prvog HVL-a na udaljenosti od 1m od fokusa cijevi (mm)			Vrijednost prvog HVL-a na udaljenosti od 1m od fokusa cijevi (mm)			Relativna devijacija (%)
	PTW TM 23331	Rel. dev. (%)	Ab. dev. ( $\mu\text{m}$ )	Spektrometar	Rel. dev. (%)	Ab. dev. ( $\mu\text{m}$ )	
N-40	2.71	3.18	83.73	2.72	3.42	90	0.37
N-60	0.230	-1.77	-4.15	0.249	6.41	15	8.26
N-80	0.579	0.09	0.54	0.611	5.71	33	5.53
N-100	1.07	-1.97	-21.51	1.08	-0.92	-10	0.93
N-120	1.72	3.21	53.62	1.44	-13.77	-230	-16.28
N-150	2.44	5.89	135.42	2.49	8.26	190	2.05

Relativna devijacija vrijednosti prvog HVL-a, najveća je za kvalitet N-120 i iznosi 16.28 %. Dok za ostale kvalitete prikazane u tabeli relativna devijacija je manja od 8.3 %.

## Zaključak

Cilj Master rada bio je da se ispituju zahtjevi standarda ISO 4037-1:2019. Ideja za rad, kao što je već pomenuto, nastala je iz jednog od radnih paketa projekta. Uočena su neslaganja između teorijskih proračuna, datih u standardu i eksperimentalnih proračuna.

Određene analize rađene su sa spektrometrijskom i dozimetrijskom metodom, čiji su rezultati upoređivani i uočene su značajne razlike. Mjerenja, za određivanje HVL-a dozimetrijskom metodom, rađena su sa cilindričnom komorom dijametra 8 mm i referentnim etalom LMRI dijametra 14 cm i ustanovljeno je na osnovu rezultata da su vrijednosti HVL-a određenih na osnovu mjerenja sa referentnim etalom bliže gornjoj granici dozvoljene maksimalne apsolutne devijacije za HVL. Što znači da zahtjev standarda da dijametar komore za određivanje HVL-a treba da bude manji od 3 cm je opravdan, s tim da su ostali zahtjevi standarda vezano za aparat za HVL mjerenja bili ispunjeni.

Pomoću spektrometra određen je uticaj fluorescentnog zračenja i uočeno je da mijenjajući redoslijed filtracije kod određenih kvaliteta zračenja u odnosu na onaj preporučen standardom, imamo fluorescentno zračenje koje nismo mogli detektovati jonizacionim komorama. Određivanje HVL-a spektrometrijskom metodom nismo mogli sprovesti do kraja, urađena je samo procjena prvog i drugog HVL-a na osnovu spektra visine impulsa. Potrebno je kreirati matricu odziva kako bi se izmjereni spektar korigovao za gore pomenute negativne uticaje.

## Literatura

1. Jerrold T. Bushberg, J. Anthony Seibert, Edwin M. Leidholdt Jr, John M. Boone, *The Essential Physics of Medical Imaging*, University of California, Davis Sacramento, California, Shields Ave, Davis, CA 95616, US, 2012. godina.
2. Nuclear data: <http://www.nucleide.org/Laraweb>, pristupano u oktobru 2021.
3. Borislava Petrović, *Fizičke osnove radioterapije*, Univerzitet u Novom Sadu Prirodno-Matemački Fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, 2018.godine.
4. Jonizacioni detektori: <https://www.sciencedirect.com>, pristupano u septembru 2022.
5. Ionizing Radiation Detectors Catalog, PTW, 2012/2013.
6. Complete X-Ray Spectrometer with CdTe Detector, User Guide and Operating Instructions Amptek, Inc., 14 DeAngelo Dr. Bedford, MA 01730, [www.amptek.com](http://www.amptek.com), pristupano u oktobru 2021.
7. Dana Kurkova, Libor Judas, *X-ray tube spectra measurement and correction using a CdTe detector and analytic response matrix for photon energies up to 160 keV*, The National Radiation Protection Institute, Bartoskova 28, CZ-140 00 Prague 4, Czech Republic, 17.07.2015. godine.
8. J. Iwanczyk, W.M. Szymczyk, M. Traczyk, R. Triboulet, *X-ray fluorescence escape peaks in gamma-ray spectra detected by CdTe detectors*, institute of Nuclear Research, SLDP, 05-400 Swierk, Poland and Laboratoire de Physique des Soldes, 92190 Meudon-Bellevue, France, 09.05.1979.godine.
9. U. Ankerhold, R. Behrens and P. Ambrosi, *X ray spectrometry of low energy photons for determining conversion coefficients from air kerma to personal dose equivalent, Hp(10), for radiation qualities of the iso narrow spectrum series*, PTB, Bundesallee 100, 338116 Braunschweig, Germany, 29.09.1998.godine.
10. V. Bandalo, M.B. Greiter, J. Bronner, H. Hoedlmoser, *ISO 4037:2019 validation of radiation qualities by means of half-value layer and Hp(10) dosimetry*, Individual Monitoring Service, Helmholtz Zentrum Munchen-German Research Center for Environmental Health (GmbH), Otto-Hahn-Ring 6, 81739 Munich, Germany, 2019.godine.
11. B. Behnke, O. Hupe and P. Ambrosi, *Implications of X ray tube parameter deviations in X ray reference fields*, PTB, Bundesallee 100, Braunschweig D-38116, Germany, 2015.godine.
12. Gavin Poludniowski, Artur Omar, Robert Bujila, Pedro Andreo, *Technical Note: SpekPy v2.0-a software toolkit for modeling x-ray tube spectra*, Medical Radiation Physics and Nuclear Medicine, Karolinska University Hospital and Institute, Stockholm, Sweden, 10.06.2021.godine.
13. ISO 4037:2019, International Organization for Standardization, *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1,2,3,4*, ISO, Geneva,

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA  
INFORMACIJA

*Redni broj:*

**RBR**

*Identifikacioni broj:*

**IBR**

*Tip dokumentacije:*

**TD**

*Tip zapisa:*

**TZ**

*Vrsta rada:*

**VR**

*Autor:*

**AU**

*Mentor:*

**MN**

*Naslov rada:*

**NR**

*Jezik publikacije:*

**JP**

*Jezik izvoda:*

**JI**

*Zemlja publikovanja:*

**ZP**

*Uže geografsko područje:*

**UGP**

*Godina:*

**GO**

*Izdavač:*

**IZ**

*Mjesto i adresa:*

**MA**

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Master rad

Milica Stupar

prof. dr Nataša Todorović

Određivanje HVL-a u oblasti zaštite od  
zračenja dozimetrijskom i spektrometrijskom  
metodom  
srpski (latinica)

srpski/engleski

Srbija

Vojvodina

2022

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositelja  
obradovića 4, Novi Sad

*Fizički opis rada:*

**FO**

Broj poglavlja: 9

Broj strana: 52

Broj tabela: 19

Broj slika: 27

Broj grafika: 19

Broj referenci: 13



*Naučna oblast:*  
**NO**  
*Naučna disciplina:*  
**ND**  
*Predmetna odrednica/ključne riječi:*  
**PO**  
**UKD**  
*Čuva se:*  
**ČU**  
*Važna napomena:*  
**VN**  
*Izvod:*  
**IZ**

Fizika  
Medicinska fizika  
Dozimetrija, zaštita od zračenja,  
spektrometrija, HVL, jonizacione komore  
Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a  
u Novom Sadu  
nema

*Datum prihvatanja teme od NN vijeća:*

**DP**

*Datum odbrane:*

16.12.2022.

**DO**

*Članovi komisije:*

Predsjednik: prof. dr Jovana Nikolov

**KO**

član: dr Miloš Živanović

član: prof. dr Nataša Todorović

UNIVERSITY OF NOVI SAD

FACULTY OF SCIENCE AND  
MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

*Accession number:*

**ANO**

*Identification number:*

**INO**

*Document type:*

Monograph publication

**DT**

*Type of record:*

Textual printed material

**TR**

*Content code:*

Final paper

**CC**

*Author:*

Milica Stupar

**AU**

*Mentor/comentor:*

prof. dr Nataša Todorović

**MN**

*Title:*

Determination of HVL in the area of  
radiation protection by using dosimetry  
and spectrometry method

**TI**

<i>Language od text:</i>	Serbian (Latin)
<b>LT</b>	
<i>Language of abstract:</i>	English
<b>LA</b>	
<i>Country of publication:</i>	Serbia
<b>CP</b>	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
<b>LP</b>	
<i>Publication year:</i>	2022
<b>PY</b>	
<i>Publisher:</i>	Author's reprint
<b>PU</b>	
<i>Publication place:</i>	Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
<b>PP</b>	
<i>Physical description:</i>	
<b>PD</b>	
<i>Scientific field:</i>	Physics
<b>SF</b>	
<i>Scientific discipline:</i>	Medical Physics
<b>SD</b>	
<i>Subject/Key words:</i>	Dosimetry, radiation protection, spectrometry, HVL, ionisation chambers
<b>SKW</b>	
<b>UC</b>	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
<b>HD</b>	
<i>Note:</i>	none
<b>N</b>	
<i>Abstract:</i>	
<b>AB</b>	
 <i>Accepted by the Scientific Board:</i>	
<b>ASB</b>	
<i>Defended on:</i>	16.12.2022.
<b>DE</b>	
<i>Thesis defend board:</i>	
<b>DB</b>	President: prof. dr Jovana Nikolov Member: dr Miloš Živanović Member: prof. dr Nataša Todorović